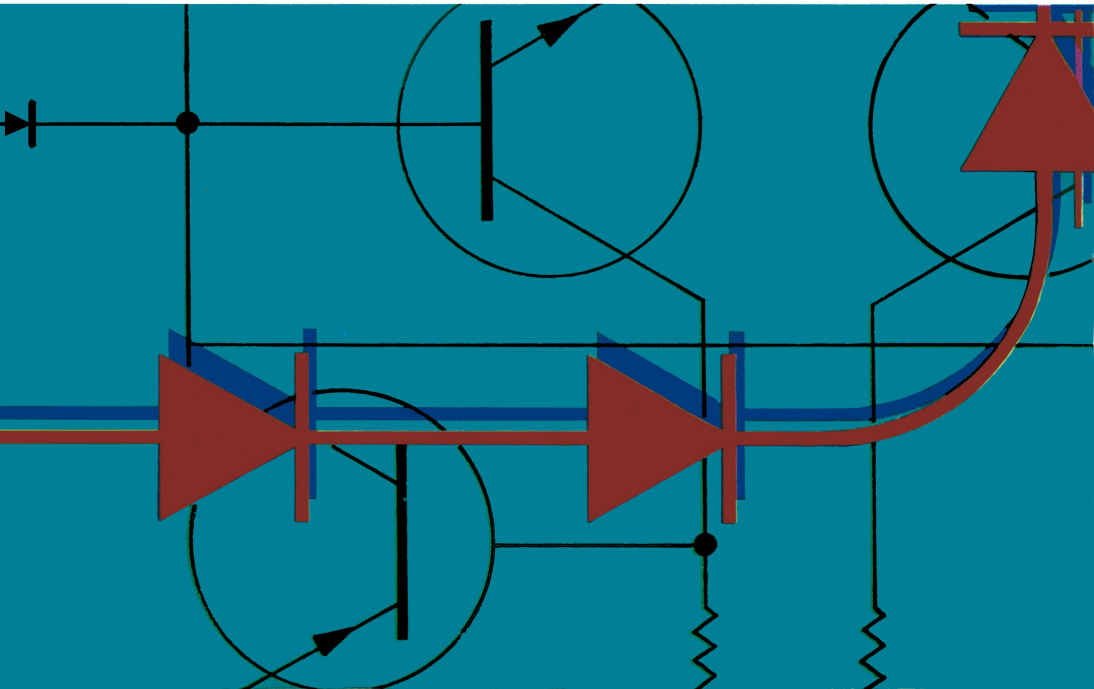
Comprendere l'Elettronica a Stato Solido

EDIZIONE ITALIANA

a cura del "Learning Center" della Texas instruments

JACKSON ITALIANA EDITRICE



Comprendere l'Elettronica a Stato Solido

a cura del

Learning Center
della
Texas Instruments

JACKSON ITALIANA EDITRICE S.r.l.
Piazzale Massari, 22 - 20125 Milano

Questo libro viene presentato come parte di un progetto del "Learning Center" della Texas Instruments realizzato con il contributo principale di William E. Hafford e Eugene W. McWhorter. Altri collaboratori: A.M. Bond, J.S. Campbell, J.R. Carter, Jr., J.E. Chambers, D.L. Garza, D.K. Gobin, G. Keegan, A.L. Feris, W.L. Kenton, L.J. Le Vieux, G.P. McKay, J.R. Miller, E.G. Morrett, R.E. Sawyer, D.C. Scharringhausen, F.H. Walters, D.C. Ward e altri.

Copyright© 1972 Texas Instruments Incorporated per l'edizione originale in lingua inglese
Copyright© 1979 Texas Instruments Incorporated per l'edizione italiana

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta, registrata o trasmessa in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo, elettronico, meccanico, fotocopia, ecc. senza l'autorizzazione scritta della Texas Instruments Incorporated.

Prima edizione: Novembre 1979
Stampato in Italia da:
Litografia del Sole S.r.l. - Via Isonzo, 14 - 20094 Buccinasco (MI)

PREFAZIONE

Questo libro è stato scritto per coloro che vogliono o hanno la necessità di imparare l'elettronica ma non possono dedicare ad essa anni di studio. La difficoltà fondamentale nel realizzare un simile testo, consisteva nello spiegare concetti di ingegneria senza far uso della matematica. I questo libro perciò, troverete solo nozioni di aritmetica elementare. Una seconda difficoltà era costituita dalla necessità di insegnare concetti tecnici a persone senza un'adeguata preparazione. Per questo il libro comincia "da zero" e spiega ogni concetto man mano che si presenta.

Quasi tutti i precedenti tentativi di divulgare argomenti scientifici sotto questa forma hanno lasciato il lettore con una conoscenza piuttosto superficiale del tema trattato. Tutte le persone che hanno letto questo libro invece, assicurano di essere in grado di non sfigurare anche in conversazioni tecniche con ingegneri elettronici.

In origine, il corso era stato sviluppato sotto forma di un nastro video di 12 ore. Un suo adattamento è stato pubblicato come una serie di 18 lezioni dalla rivista "Electro-Procurement" e nella pubblicazione interna DallaSite della TI. Migliaia di persone, dal semplice impiegato all'ingegnere meccanico, hanno completato il corso. Tutti hanno riferito di aver tratto profitto dal corso. E il corso ha tratto profitto dai loro numerosi e costruttivi suggerimenti.

Con questa pubblicazione avremo raggiunto il nostro scopo se vi aiuteremo ad essere più efficienti nel vostro lavoro o a gustare il vostro passatempo. Ma avremo raggiunto uno scopo ancora più importante se riusciremo ad accrescere le vostre nozioni relative alla tecnologia che, più di ogni altra cosa, sta plasmando il futuro dell'umanità.

Le informazioni contenute in questo libro sono state scrupolosamente controllate. Tuttavia, non si assume alcuna responsabilità per eventuali inesattezze e per eventuali infrazioni di brevetti o diritti che possano risultare dall'uso di questo libro. Nessuna autorizzazione viene concessa implicitamente o in altro modo su diritti della Texas Instruments o di altri.

SOMMARIO

	Prefazione	3
Capitolo 1	Che cosa fa l'elettricità in ogni sistema elettrico	7
Capitolo 2	Funzioni dei circuiti fondamentali nel sistema	27
Capitolo 3	Come i circuiti prendono delle decisioni	47
Capitolo 4	Relazioni fra semiconduttori e sistemi	63
Capitolo 5	I diodi: cosa fanno e come funzionano	83
Capitolo 6	Prestazioni e caratteristiche dei diodi	99
Capitolo 7	I transistori: come funzionano e come sono fatti	115
Capitolo 8	Il transistore PNP e le caratteristiche dei transistori	133
Capitolo 9	Thyristori ed opto-elettronica	151
Capitolo 10	Introduzione ai circuiti integrati	179
Capitolo 11	Circuiti integrati digitali	191
Capitolo 12	MOS e circuiti integrati lineari	211
	Risposte ai quesiti	221

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 1

Elettroni Minuscole particelle costituenti l'elettricità

Tensione Pressione o densità degli elettroni in un filo e circuito elettrico. Di solito espressa in volt (V)

Corrente Flusso di elettroni. Di solito espressa in Ampere (A), milliampere (mA) o microampere (μA)

Resistenza Difficoltà nel far passare la corrente elettrica in un filo metallico quando è applicata una tensione. Di solito espressa in ohm (Ω) o kiloohms (k Ω)

Corrente Continua Flusso di elettroni che va solo in una direzione. Abbreviata: c.c.

Corrente Alternata Corrente elettrica il cui flusso si inverte (o si alterna) a intervalli regolari. Abbreviata: c.a.

Frequenza Quante volte al secondo una corrente alternata compie un ciclo completo (tornando indietro e poi andando di nuovo avanti). In passato espressa in cicli al secondo (cps) e relativi multipli. Oggi espressa nelle unità equivalenti hertz (Hz), kilo hertz (kHz), megahertz (MHz) e gigahertz (Ghz).

Digitale Metodo di trasmissione delle informazioni in un circuito elettrico commutando la corrente (aperto-chiuso).

Analogico Metodo di trasmissione delle informazioni in un circuito elettrico regolando la corrente o la tensione

Modulazione di ampiezza Varietà di analogico in cui le informazioni vengono trasmesse nel circuito variando (modulando) l'*ampiezza o l'altezza* delle onde elettriche

Modulazione di frequenza Varietà di analogico in cui le informazioni vengono trasmesse nel circuito variando (modulando) la *frequenza* delle onde elettriche

CAPITOLO 1

CHE COSA FA L'ELETTRICITA' IN OGNI SISTEMA ELETTRICO

Entriamo nel vivo dello studio dei semiconduttori e dei sistemi elettrici con due enunciati generali che forniscono un punto di partenza per semplificare i concetti. Il primo enunciato è:

Tutti i sistemi elettrici o manipolano le informazioni, o lavorano, o fanno entrambe queste cose. A prescindere dalla reale complessità del sistema, ogni cosa che il sistema fa, cade in una di queste categorie-informazione o lavoro.

Il secondo enunciato è: *Tutti i sistemi elettrici sono organizzati in modo simile.* Possiamo chiamare questo principio, "Il principio dell'organizzazione universale dei sistemi". Ogni sistema può venir suddiviso in tre fondamentali elementi di organizzazione: elementi *sensori, di decisione e di azione.*

In Figura 1.1 abbiamo uno schema a blocchi del "Sistema Universale". Il sistema deve avere degli ingressi, come quelli indicati dalle frecce entranti.

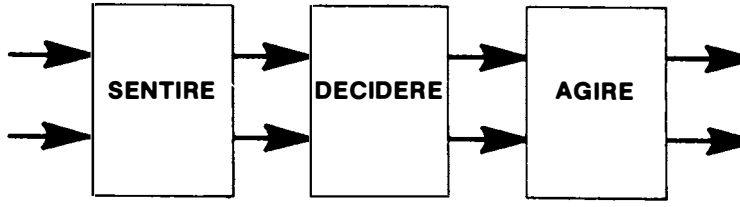


Figura 1.1

Tipicamente, questa informazione in ingresso è non - elettrica - come, per esempio, quella ottenuta azionando il comando di avviamento in un'automobile. Tra un rettangolo e l'altro dobbiamo quindi avere un flusso di informazioni come indicato dalle frecce. Finalmente, nello stadio dell'azione, abbiamo una conversione di informazioni nell'azione desiderata, come indicato dalle frecce "azione". Questa azione può essere o lavoro o informazione in una forma desiderata. Il lavoro, per esempio, può essere dato dal rapido ruotare della punta, ad opera del motore, in un trapano elettrico; l'informazione, nella forma voluta, può essere data dai numeri presentati come risposta in una calcolatrice elettronica da tavolo.
Tutto ciò che fa il nostro Sistema Universale - e tutto ciò che fa un qualsiasi sistema elettrico - è di manipolare l'informazione o compiere un lavoro. Ed in ogni sistema troveremo l'immissione di informazioni, un flusso interno di informazioni e delle azioni risultanti. Una familiare analogia ci è data dal corpo umano. Voi toccate una stufa calda. Le vostre dita *sentono* il calore; questo è l'immissione dell'informazione. L'informazione va al vostro cervello; questa è la parte del sistema *decisione.* Viene presa una decisione e l'informazione risultante va allora allo stadio *azione*, ossia al

vostro braccio. A questo punto, l'informazione viene convertita nell'azione desiderata, ossia nel rapido allontanamento della vostra mano; questo allontanamento della mano è un lavoro. In alternativa, supponete che la vostra mano resti attaccata alla stufa. Incapaci di allontanarla, voi chiedete aiuto.
Questa richiesta può venir considerata una forma d'informazione desiderata, in opposizione al lavoro. Vediamo così che il nostro sistema umano, come i sistemi elettrici, può essere suddiviso negli stadi di senso, decisione e azione.

Avviciniamoci ora un pò di più all'elettronica. La Figura 1.2 presenta uno schema funzionale o a blocchi di un sistema semplice, ma tipico, di controllo termo-

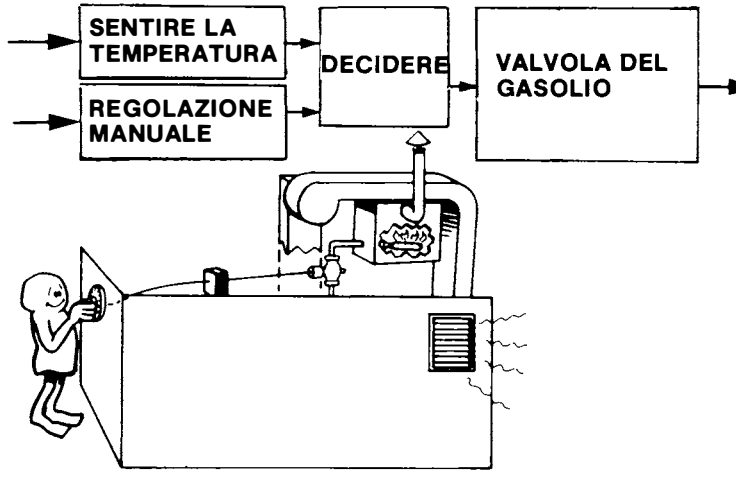


Figura 1.2

statico per un'unità centrale di riscaldamento. Questo sistema deve essere un dispositivo sensore della temperatura e un dispositivo di controllo che può essere regolato per la temperatura desiderata. Entrambi questi dispositivi convertono un'informazione esterna mettendola sotto una forma che può essere trattata internamente. Il dispositivo sensore di temperatura, una specie di termometro, comunica al sistema quando la temperaura ambiente è scesa al di sotto o salita al di sopra del livello desiderato. Il sistema di controllo dice al sistema qual'è il livello desiderato. Così questi dispositivi convertono un'informazione esterna in un'informazione interna che può essere trattata dal sistema. Successivamente il sistema deve far uso di questi due flussi di informazioni e arrivare a una decisione. In questo caso, è una decisione che, in sostanza, dice alla valvola del gasolio di aprirsi o chiudersi. Se la decisione è di aprirsi, l'attuatore della valvola converte questa informazione nell'azione di spostare le parti piuttosto pesanti della valvola. Così, anche in questo caso, vediamo come il nostro sistema è organizzato secondo lo schema universale: *Sentire, decidere, agire.* Inoltre, abbiamo trattato o un'informazione o un lavoro: informazione all'ingresso, lavoro all'uscita.

Facciamo ancora un esempio. La Figura 1.3 rappresenta lo schema a blocchi di un sistema ad alta fedeltà. Per prima cosa abbiamo un'immissione di segnale dalla puntina e dal fonorivelatore; questi due componenti compiono una funzione di ricerca quando il solco del disco passa sotto la puntina.
Abbiamo anche un'immissione dai comandi manuali del volume e dei toni. L'infor-

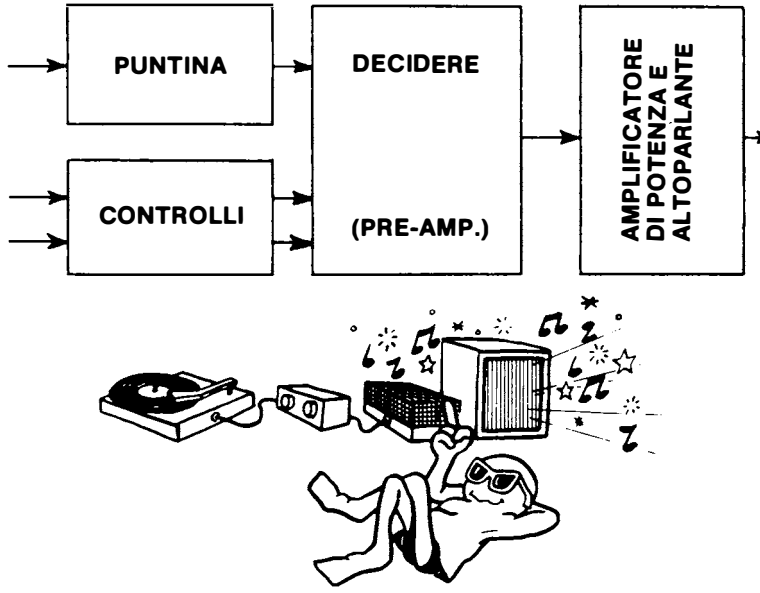


Figura 1.3

mazione elettrica interna proveniente da questi dispositivi di ingresso va, di solito, ad un preamplificatore che, in sostanza, decide cosa l'altoparlante dovrà fare, essendo la decisione basata sul segnale d'informazione in entrata all'amplificatore di potenza. Il segnale amplificato viene passato all'altoparlante, che, finalmente, agisce per produrre il suono nell'aria. Così, ancora una volta, possiamo dividere l'intero sistema in tre sezioni: una che sente, una che decide e una che agisce.

Sentirete adoperare altri termini per questi tre stadi di un sistema. Adoperiamo i termini "sentire, decidere e agire" perché essi sono facili da visualizzare ma i termini "immettere, elaborare ed emettere" sono loro sinonimi. Sentirete anche adoperare i termini "interfaccia in ingresso" e "interfaccia in uscita".
Questi sono dei termini molto appropriati per gli stadi che sentono e agiscono, poichè questi stadi agiscono come interfacce o "intermediari", convertenti l'informazione e il lavoro fra il mondo esterno e il sistema elettrico.

Il dispositivo di controllo di una caldaia e il sistema ad alta fedeltà sono dei sistemi relativamente semplici. Ma osserviamo un calcolatore e vediamo come questa stes-

sa Organizzazione Universale esiste in sistemi più complessi. Dalla Figura 1.4 appare che il calcolatore è, esso pure, suddiviso in tre segmenti tipici.

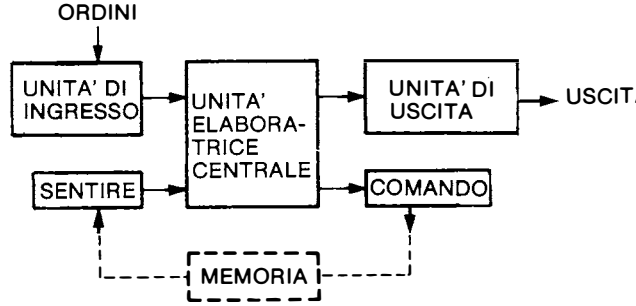


Figura 1.4

Ma in questo caso cominciamo a rilevare la maggior complessità del calcolatore mostrando che il blocco di rilevamento o "ingresso" è suddiviso in due sezioni che accolgono due flussi di informazione. Similmente, il blocco di azione o di "uscita" è anch'esso diviso in due parti. Il segmento che prende le decisioni, secondo la terminologia dell'Organizzazione Universale, è l'unità elaboratrice centrale del calcolatore.

IN CHE MODO I SISTEMI FANNO USO DELL'ELETTRICITA' PER MANIPOLARE LE INFORMAZIONI ED ESEGUIRE UN LAVORO?

Ora che avete afferrato il concetto di come, in linea di massima, siano organizzati tutti i sistemi elettrici ed elettronici, la domanda seguente è: "Come fanno queste cose i sistemi per manipolare le informazioni ed eseguire il lavoro?". I sistemi elettrici ed elettronici compiono queste funzioni per mezzo dell'elettricità, servendosi di circuiti elettrici che, tipicamente, impiegano dei semiconduttori. Più avanti, in questo libro, parleremo dei circuiti e dei semiconduttori. Ma, fin d'ora, è necessario comprendere come l'elettricità possa manipolare le informazioni ed eseguire il lavoro. Che cosa, dell'elettricità, permette di fare queste cose, la tensione, la corrente o altre sue caratteristiche?

L'elettricità è, in realtà, piuttosto semplice, perchè si comporta come un liquido. Essa scorre come l'acqua. E, come l'acqua, tende a riempire ogni spazio disponibile. L'elettricità è costituita da particelle minuscole chiamate elettroni, che esistono in ogni specie di materia. In un filo metallico, gli elettroni possono essere pompati come l'acqua, da un generatore o da una batteria. Gli elettroni si respingono l'un l'altro, cosicchè essi tendono a raggiungere la stessa densità in tutti i punti di un circuito, proprio come l'acqua che cerca lo stesso livello sotto l'influsso della forza di gravità. Poichè vi sono tante somiglianze fondamentali fra il comportamento dell'acqua e quello dell'elettricità, possiamo illustrare le caratteristiche elettriche, impiegando l'analogia con un flusso d'acqua.

La Figura 1.5 rappresenta una chiusa aperta superiormente e contenente ac-

qua. Abbiamo un omino che manovra una pompa, che rappresenta l'equivalente di un generatore elettrico.

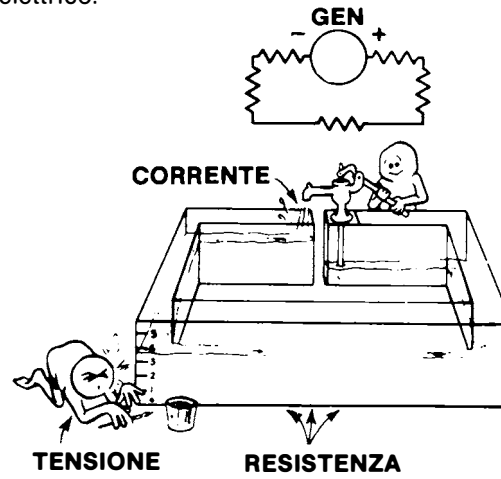


Figura 1.5

Man mano che l'uomo pompa acqua da un estremo all'altro della chiusa l'acqua sale di livello e di pressione a un estremo della chiusa e scorre a cercare il livello più basso all'altro estremo della chiusa. L'elettricità fa esattamente lo stesso. Quando gli elettroni sono pompati all'estremità di un filo, sono costretti ad ammucchiarsi raggiungendo un'alta densità e tendono a scorrere verso la zona di minor densità all'altra estremità del filo. Questa densità degli elettroni può essere considerata come una pressione e viene misurata in volt. *La tensione* è la misura della *pressione* degli elettroni.

Nel comparare l'acqua all'elettricità, possiamo vedere che l'altezza dell'acqua nella chiusa è equivalente alla densità degli elettroni. Ma, con l'elettricità, dobbiamo anche preoccuparci del *flusso* di elettroni, che chiamiamo *"corrente"*. Il flusso d'acqua viene misurato in litri al minuto, il flusso di elettroni, o corrente elettrica, viene misurato in ampere.

La relazione fra la tensione e la corrente nei circuiti elettrici è proprio come la relazione fra il livello dell'acqua e il flusso in una chiusa. Consideriamo la Figura 1.6.

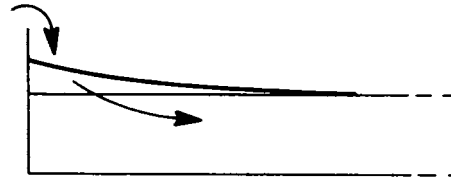


Figura 1.6

Supponiamo che la linea orizzontale superiore sia il livello di partenza dell'acqua nella chiusa.

Se aumentiamo l'altezza dell'acqua all'estremità di sinistra pompandola per darle velocità, accresciamo anche la pressione dell'acqua a quell'estremità. In conseguenza, l'acqua scorrerà verso l'estremità di destra a una velocità maggiore, - più litri al minuto. Lo stesso accade per l'elettricità. Se accresciamo la differenza di tensione nel circuito, facciamo aumentare la corrente o velocità del flusso elettrico.

C'è un altro fattore che può influenzare sia il flusso d'acqua che il flusso di elettricità. Questo fattore è chiamato resistenza. Nel caso del flusso d'acqua, la resistenza è principalmente creata dalle proprietà costruttive delle pareti della chiusa.

L'elettricità, come l'acqua, viene limitata nel suo flusso dalla natura del conduttore. In una chiusa, o in un filo, la resistenza sarà costante finchè le caratteristiche del conduttore restano le stesse.

Tuttavia, la resistenza può venire alterata. In Figura 1.7 si vede come le pareti laterali della chiusa siano state avvicinate, limitando così il passaggio dell'acqua e facendo quindi aumentare la resistenza.

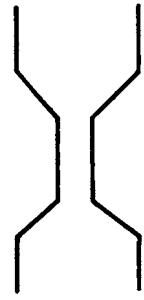


Figura 1.7

Possiamo fare lo stesso con il flusso di corrente elettrica facendo uso di una resistenza variabile. Cosa succede quando avviciniamo le pareti lateriali della chiusa?

Se l'uomo continua a pompare allo stesso numero di litri al minuto, l'acqua diventa più alta a un estremità della chiusa. La stessa cosa succede con l'elettricità; la differenza di tensione cresce; essa è maggiore ad un'estremità che non all'altra. Così possiamo vedere che tensione, corrente e resistenza sono tutte in relazione fra loro. Se ne cambiate una, ciò fa cambiare una delle altre due o entrambe.

L'elettricità, come l'acqua, deve scorrere per portare un'informazione o eseguire un lavoro. Per scorrere, essa deve venire da qualche parte e andare verso qualche altra parte. Di solito è conveniente farla scorrere in un circolo per tener conto di questo problema, ed è di qui che ci viene il termine di "circuito elettrico".

Prima di procedere, torniamo per un momento alla Figura 1.5 e osserviamo lo schema del circuito elettrico, rappresentato dalla nostra analogia idraulica, il cerchio rappresenta il generatore. Le linee uscenti da - ed entranti nel -generatore rappresentano i conduttori (o fili). E la sezione a zig-zag indica la resistenza del conduttore; questo simbolo a zig-zag sta anche a indicare una resistenza.

COME FA' L'ELETTRICITA' A TRASPORTARE POTENZA?

L'utilità del flusso di elettricità consiste nel trasportare energia, o potenza, da un posto all'altro. Questa energia può venire immessa in un punto e usata in un altro punto. La Figura 1.8 è un'analogia con acqua che illustra questo fatto. L'energia viene *immessa* nell'elettricità pompandola da una bassa tensione ad un'alta tensione. Si *ricava* energia dall'elettricità facendola cadere da un'alta tensione ad una bassa tensione.

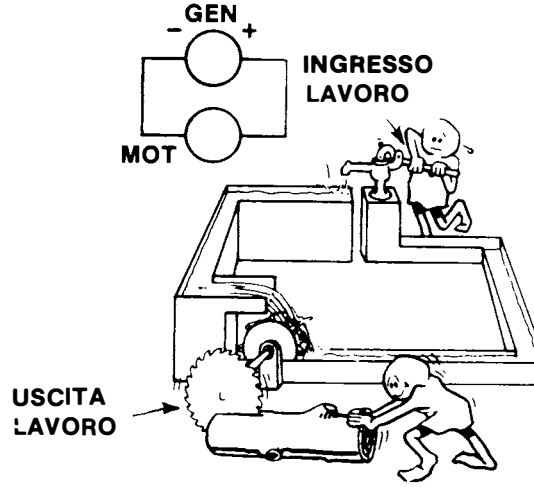


Figura 1.8

In analogia con l'acqua, l'energia viene convertita nell'utile lavoro di segare legna da una ruota ad acqua (o turbina). Possiamo immettere più potenza nella turbina aumentando la differenza di tensione (l'altezza di caduta dell'acqua) o la corrente (il flusso di acqua).

Elettricamente parlando, la pompa che vediamo qui è rappresentativa di un qualsiasi dispositivo che immette energia nell'elettricità. Continueremo a chiamarla generatore, che è un dispositivo che converte energia meccanica in energia elettrica. Ma la pompa idraulica può egualmente rappresentare un microfono, che converte energia sonora in energia elettrica. La turbina rappresenta un qualsiasi dispositivo che riconverte energia esterna - per esempio un motore, che produce energia meccanica, o un altoparlante, che produce energia sonora. Per maggior semplicità ci riferiamo generalmente alla turbina come ad un motore. La figura 1.8 riporta anche lo schema elettrico equivalente a questo semplice circuito.

Vediamo ora cosa succede se togliamo la ruota dalla caduta d'acqua, come in Figura 1.9. Per quanto essa abbia a che fare con il resto del circuito, non cambia nulla, se la togliamo l'acqua continua a scorrere attraverso il salto della caduta e l'unica

variante è che non si ottiene nessun lavoro. La caduta d'acqua è ora, semplicemente, l'equivalente di una resistenza.
Ma cosa avviene dell'energia (il lavoro) che viene tuttora immessa nell'acqua dalla pompa? Essa viene semplicemente dissipata dall'attrito, o resistenza, nella caduta.

Figura 1.9

E, come ogni attrito, produce calore; è là che va a finire l'energia, a riscaldare l'acqua e la chiusa. La stessa cosa avviene nel nostro circuito elettrico. Ogni dispositivo, come un motore, che compie un lavoro, può essere sostituito in un circuito da una resistenza, senza aver alcun effetto sul circuito, tranne per il fatto che il lavoro che potrebbe essere compiuto viene invece sprecato sotto forma di calore e la resisenza si riscalda. E' questo il modo in cui lavorano gli elementi a riscaldamento elettrico e i filamenti delle lampadine.

Il punto è che ogni qualvolta l'elettricità scorre da una tensione più alta a una tensione più bassa - avvenga ciò solo da un estremo all'altro del filo o attraverso una resistenza o attraverso un motore o qualsiasi altro dispositivo - ne deve venire energia. Se non si recupera l'energia sotto forma di lavoro o di altro, essa riscalda il filo o il dispositivo. Nello schema di Figura 1.9 vediamo questo calore, rappresentato con delle frecce, irradiato dalla resistenza.

IN CHE COSA DIFFERISCE LA CORRENTE ALTERNATA DALLA CORRENTE CONTINUA?

Nei circuiti visti finora, la corrente scorre in una direzione.
Questa corrente è chiamata "corrente continua" o "c.c.". Un circuito a corrente alternata lavora esattamente come un circuito a corrente continua, tranne per il fatto che occorre uno speciale generatore per pompare corrente prima in una direzione, attraverso il circuito e il motore e poi nell'altra direzione. E uno speciale motore viene usato per recuperare lavoro dalla corrente diretta nell'una o nell'altra direzione.

In Figura 1.10 è rappresentato un circuito a corrente alternata in forma idraulica. Questo circuito è equivalente al circuito con motore e generatore a corrente continua già visto in Fig. 1.8. La pompa speciale rappresenta un generatore in c.a. La pala, o pistone, collegata alla leva di pompaggio spinge l'acqua prima in una dire-

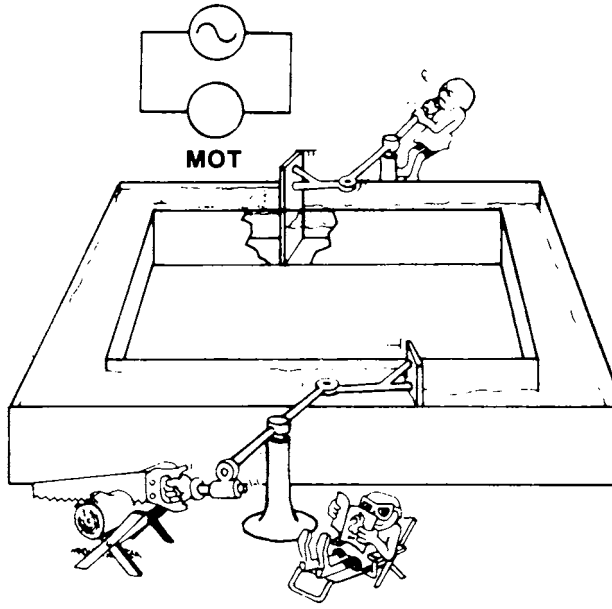


Figura 1.10

zione e poi nell'altra.
Ciò produce una tensione più alta prima su una faccia della pala e poi sull'altra, cosicchè la corrente che circola nel circuito e scorre nel motore inverte alternativamente la sua direzione.
Questa pompa, come la sua equivalente in c.c., immette energia nell'elettricità.

Il motore in c.a. è rappresentato da un'altra pala funzionante come un pistone e portata da una leva, proprio come il generatore. Quando la tensione è più alta sulla faccia sinistra che su quella della pala, questa si sposta verso destra facendo scorrere una certa corrente verso destra; poi il generatore rende la tensione sulla faccia di destra più alta e la pala e la corrente si spostano verso sinistra. L'acqua lavora durante ogni colpo della pala e il lavoro, in questo caso, viene utilizzato per segar legna.

CHE COSA E' LA FREQUENZA ELETTRICA?

La frequenza di una corrente alternata non è altro che la misura di quanto spesso essa cambia direzione, cioè quante volte al secondo una corrente compie un

"ciclo" completo, girando in senso inverso e poi andando di nuovo in avanti. Un ciclo al secondo viene chiamato un "hertz". (Vedi Figura 1.11). Naturalmente, i circuiti elettrici reali fanno uso di frequenze molto più elevate di quelle che sarebbero possibili con il nostro modello idraulico.

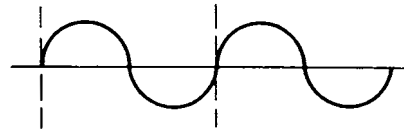


Figura 1.11

Sentirete parlare di kilohertz, cioè di migliaia di cicli al secondo, di megahertz, cioè di miliardi di cicli al secondo, di gigahertz, billioni di cicli al secondo.

COME SI CONTROLLA LA POTENZA?

Ormai dovreste avere un'idea abbastanza chiara del modo in cui l'elettricità scorre e trasporta potenza, per cui faremo un altro passo avanti. Questa potenza può essere controllata per far funzionare il sistema nel modo voluto.

Ci sono due modi per controllare la potenza. Il primo modo è di controllare semplicemente la quantità di potenza che immettete nel circuito. Nella nostra analogia idraulica della pompa e della ruota ad acqua, la potenza fornita alla sega viene controllata dalla potenza fornita alla pompa. Se l'omino pompa vigorosamente, più potenza viene fornita dalla ruota. Se egli rallenta, meno potenza viene fornita dalla ruota.
Tipicamente, però, la potenza a disposizione dei sistemi non è controllata alla sua sorgente.

Il secondo modo di controllare la potenza è quello di farlo in un certo punto del circuito diverso dalla sorgente di potenza e questo è un modo più comune. La Figura 1.12 chiarisce come ciò può essere fatto - si noti l'omino con la paratia scorrevole. Si supponga che l'uomo alla pompa lavori a un ritmo costante; come faremo a far variare la potenza di taglio della sega? Facendo scorrere la paratia dentro o fuori, l'uomo al controllo può strozzare o aprire il flusso d'acqua nella chiusa. Così l'uomo alla paratia scorrevole controlla la potenza che aziona la sega. Egli può far andare la sega velocemente o lentamente; può metterla in moto o fermarla.

L'uomo alla paratia dà una rappresentazione di tutto ciò che può essere fatto al flusso di elettricità entro un circuito, fra la sorgente di potenza e il punto di utilizzazione. Il flusso può essere ridotto o abilitato e interrotto. Questo semplice concetto è così importante da ricordare, quando consideriamo in quali modi si possa usare l'elettricità, che val la pena di ripeterlo in altre parole: *Noi possiamo fare solo due cose all'elettricità fra la sorgente di potenza e il punto d'uso: Possiamo commutarla, abilitandola o interrompendola o possiamo regolarla, come quando facciamo variare la resistenza.*

Lo schema di Figura 1.2 rappresenta quanto detto in termini elettrici. Esso indica il generatore (pompa) e il motore (ruota). Tra l'uno e l'altro, nel circuito, vi è la resistenza variabile (paratia); questa resistenza variabile può anche agire come un interruttore aperto-chiuso.

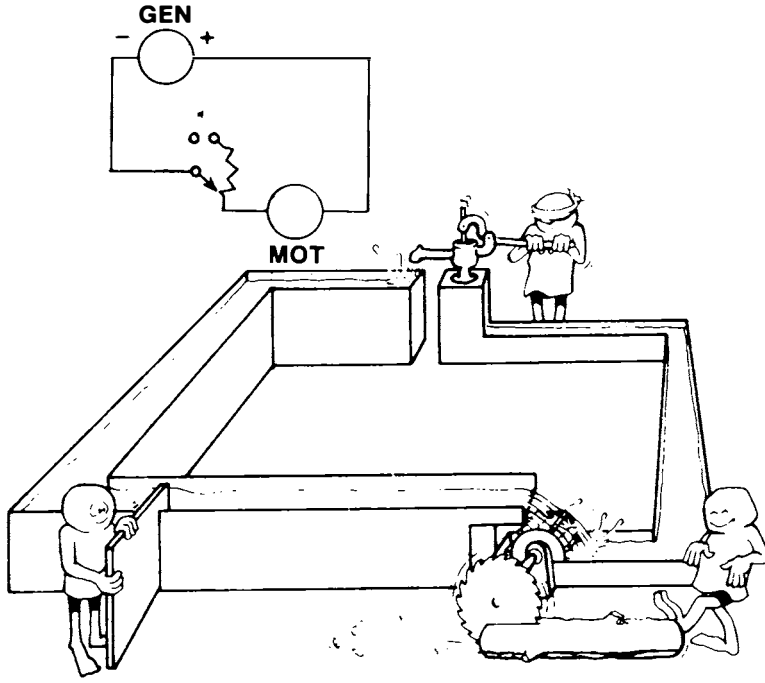


Figura 1.12

Finora non abbiamo detto molto sui semiconduttori e voi potrete chiederci cos'abbia a che fare tutto ciò con i semiconduttori.
La risposta a questa domanda è che una certa conoscenza dei semplici concetti essenziali vi fornirà le basi fondamentali o, se volete, un certo modo di pensare, che semplificherà di molto la vostra comprensione dei semiconduttori. Per esempio, una volta che vi siete resi conto che ogni sistema può essere suddiviso in sezioni relative al sentire, al decidere e all'agire, è facile comprendere e ricordare dove i vari tipi di semiconduttori abbiano più probabilità di essere usati. Voi potete capire perchè i sensori della luce si trovino principalmente nella parte *"sentire"* di un sistema. Potete vedere perchè la sezione *"decidere"* contenga principalmente diodi, transistori e circuiti integrati per piccoli segnali. Ed è facile vedere perchè i semiconduttori di potenza si trovino principlmente nelle sezioni *"agire"* nonchè in circuiti che forniscono potenza a tutto il sistema. Date queste necessarie basi, voi potete vedere, per esempio, perchè l'informazione in un sistema sia generalmente manipolata da

dispositivi per segnali piccoli e perchè il lavoro sia, più spesso, controllato da semiconduttori di potenza. Ma, a questo punto, è necessario ampliare le nostre basi.

INFORMAZIONE E LAVORO NEI SISTEMI ELETTRICI

Possiamo trattare del lavoro in fretta, poichè abbiamo visto esempi di lavoro quando abbiamo discusso i principi base dell'elettricità. Convertendo la nostra analogia idraulica in termini elettrici, possiamo dire che, nei sistemi elettrici, il lavoro è dato dalle prestazioni inerenti ad un'operazione ben visibile - un motore elettrico che solleva qualche cosa, un riscaldatore elettrico che fornisce calore, una lampadina che illumina una stanza.

La linea di separazione fra lavoro e informazione non è sempre nettamente definita - dopo tutto, la stessa lampadina che illumina un numero sul pannello indicatore di uno strumento avrebbe a che fare con *l'informazione* - ma possiamo di solito fare la distinzione richiesta chiedendoci "qual'è lo scopo principale dell'azione? Il lavoro o l'informazione?"

Il *lavoro,* così com'è eseguito da un sistema elettrico, implica dei quantitativi di potenza relativamente grandi. Una comune lampadina in casa, per esempio, richiede tipicamente più di cento watt di potenza. Le sezioni di informazione di un sistema, d'altra parte, richiedono tipicamente solo pochi milliwatt - pochi millesimi di Watt. Ma anche se il manipolare un'informazione richiede molto meno potenza di quella richiesta dal lavoro, esso viene tuttora eseguito in uno dei due modi precedentemente menzionati; l'elettricità può venir commutata o regolata. Vediamo come questi due metodi possano venire usati per inviare l'informazione.

COME VIENE INVIATA L'INFORMAZIONE CON IL METODO DIGITALE?

Il metodo che implica l'invio di informazioni per *commutazione* è chiamato *"metodo digitale"* (o numerico). Tutti i calcolatori *digitali* moderni usano questo metodo di trasmissione delle informazioni. Per contro, il metodo di inviare informazioni per *regolazione* è chiamato "metodo analogico". Radio, giradischi e calcolatori *analogici* danno degli esempi di informazioni trasmesse con il metodo analogico.

Poichè il metodo digitale è alquanto più semplice da capire, lo considereremo per primo. I calcolatori digitali usano lo stesso metodo di trasmissione impiegato da un semplice circuito telegrafico.

Esaminiamo le basi logiche del codice telegrafico, per vedere come potremmo usare tale tecnica in un calcolatore. La Figura 1.13 rappresenta lo schema di un semplice circuito telegrafico di vecchio tipo. L'alimentazione è data da una batteria, che pompa elettroni a una tensione più elevata su un lato del circuito che non sull'altro. Il semplice interruttore, nello schema, è il tasto del trasmettitore telegrafico. E come ricevitore abbiamo fatto uso di un semplice cicalino.
Nello schema, l'interruttore è in posizione di aperto. Poichè la tensione, da entrambi i lati del cicalino, è la stessa, il ricevitore è muto. Quando schiacciamo il tasto chiudendo l'interruttore, la tensione dal lato interruttore del ricevitore sale, facendo crescere il flusso di corrente ed azionando il cicalino. Quando l'interruttore ritorna in posizione di aperto, il flusso di corrente si arresta e il cicalino diventa silenzioso.

Possiamo dire, allora, che è una variazione di tensione nel filo che porta l'informazione. Possiamo visualizzare ciò, come indicato in Figura 1.14. Il livello delle li-

nee orizzontali in basso rappresenta la tensione zero, il che significa che l'interruttore è aperto. Quando si chiude l'interruttore, la tensione sale al livello più alto indica-

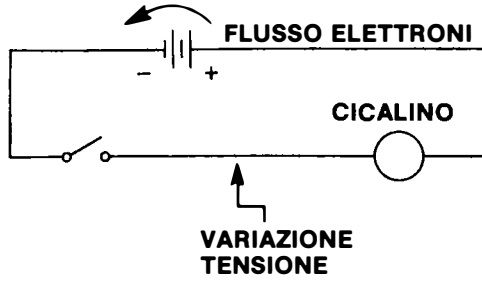


Figura 1.13

to dalle linee orizzontali superiori. Se l'interruttore viene chiuso per un tempo breve, si ha un punto di codice Morse. Se esso viene chiuso per un periodo più lungo, si ha una linea. La curva indicata dà un punto-linea, che in codice Morse è una "A". Tutto ciò semplicemente chiudendo e aprendo l'interruttore.

Vediamo ora come questo metodo digitale funzioni in un calcolatore. I calcolatori digitali sono destinati a manipolare numeri e non lettere. Ma i numeri in codice Morse sono ingombranti, con (in codice internazionale) cinque caratteri per ogni cifra, per cui i calcolatori fanno uso di un codice più efficiente, chiamato "codice a numeri binari".

Ecco come funziona. Di solito si suppone che una bassa tensione rappresenti uno zero; una tensione più alta rappresenta quindi un uno. La Figura 1.15 rappre-

Figura 1.14

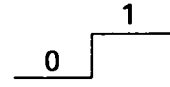


Figura 1.15

senta la curva delle tensioni. Poichè tutto ciò che noi possiamo trasmettere in codice binario sono degli zeri e degli uno, come possiamo estrarre una qualsiasi informazione dal codice? In Figura 1.16 si può vedere una parola di cinque bit; ogni zero o uno è chiamato un "bit" e un dato numero di bit costituisce una parola. Questa parola di cinque bit ci servirà da esempio, anche se i calcolatori tipici fanno uso di parole di 32 bit. Leggiamo questa parola come un numero in codice binario. Il primo

bit leggendo da destra, sta per uno; il secondo bit, per 2; il terzo, per 4; il quarto per 8; il quinto per 16. Ora si pensi agli zeri come se stessero per "no" ed agli uno per "si". Così, possiamo leggere la parola da destra a sinistra, in questo modo: sì, abbiamo uno. No, non abbiamo un due. Sì, abbiamo un quattro. No, non abbiamo un otto. Sì, abbiamo un sedici. Sommiamo i valori che abbiamo, come abbiamo fatto sulla linea di fondo della figura, e avremo ventuno. Così, ventuno è il numero rappresentato dalla parola 10101 in codice binario.

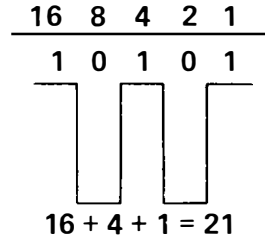


Figura 1.16

E' facile vedere come sia possibile sommare altri bit alla sinistra. Il prossimo bit rappresenterà trentadue, quello dopo, sessantaquattro, quello dopo ancora, centoventotto, etc. In questo modo, possiamo trasmettere numeri grandi a piacere. E, naturalmente, possiamo anche codificare delle frazioni decimali. I calcolatori digitali fanno uso di molti altri codici, come quello decimale a codificazione binaria, il codice Gray e, per le lettere, il codice Hollerith. Ma tutti questi codici fanno uso solo di zeri e di uno, per cui sono tutti codici binari. "Binario" significa "a due stati": aperto o chiuso (sì o no).

Questo semplice principio di trasmissione delle informazioni digitali è rimasto lo stesso del sistema telegrafico di vecchio tipo fino ai più moderni e potenti calcolatori digitali di oggi. Avrete probabilmente sentito parlare dell'algebra Booleana - è un intero sistema di matematica complessa basato sul conteggio binario, che permette ai calcolatori di eseguire calcoli altamente sofisticati.

COME VIENE TRASMESSA UN'INFORMAZIONE CON IL METODO ANALOGICO?

Poiché i soli due metodi per controllare il flusso di elettricità consistono nel commutarlo o nel regolarlo e il metodo digitale fa uso della commutazione, ne segue che il solo altro metodo a disposizione deve impiegare la regolazione. Così è, ed esso viene chiamato "metodo analogico". Per spiegare il metodo analogico, possiamo far uso sostanzialmente dello stesso circuito che abbiamo impiegato nel discutere il metodo digitale. Tuttavia, in Figura 1.17, abbiamo rimpiazzato il semplice interruttore del metodo digitale con una resistenza variabile per regolare la tensione. Ed invece di un cicalino, facciamo uso di un voltmetro (questo è uno strumento di misura speciale, un galvanometro la cui scala è calibrata in Volt). Così, ora, la resistenza variabile regola la tensione nella linea che va al Voltometro.

In questo metodo analogico, una misura dell'elettricità nella linea dà direttamente il numero che vogliamo trasmettere. Se, per esempio, prendiamo, al posto del

numero, una misura del livello di *tensione*, abbiamo un sistema analogico di *tensione*. Supponiamo di regolare la tensione portandola a 10,5 Volt, mediante la resistenza variabile. Allora, quando leggiamo il voltmetro, leggeremo effettivamente il numero 10,5. Oppure, mettendo a punto il codice con il ricevitore, si potrà avere il doppio di 10,5 o il quadrato di 10,5, etc. Se avremo variato la tensione regolando la resistenza variabile fino a portarla, mettiamo, a 2,36, trasmetteremo un numero diverso.

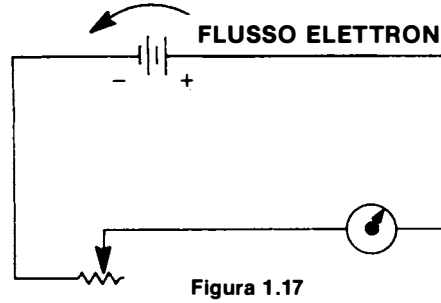


Figura 1.17

Un grandissimo numero di sistemi elettrici impiega il metodo analogico di tensione per trasmettere informazioni. La maggior parte degli indicatori di livello del carburante, di vecchio tipo, nelle automobili, funziona in questo modo: un galleggiante nel serbatoio della benzina controlla la resistenza variabile. Il variare del livello della benzina, varia la tensione che va all'indicatore. Questo, in realtà, è un voltmetro, la cui scala è marcata da vuoto a pieno, anziché in Volt. Un altro esempio di dispositivi analogici di tensione è dato dai calcolatori analogici, in cui la tensione sta al posto dei numeri o delle funzioni matematiche di numeri. E nei telefoni in cui la tensione sta al posto della pressione fluttuante dell'aria, che l'orecchio interpreta come suono.

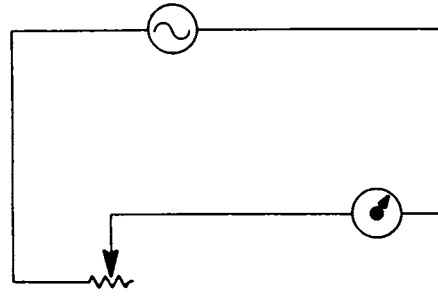


Figura 1.18

Si possono usare, per trasmettere informazioni misure diverse da quelle della tensione. I sistemi analogici di *corrente*, per esempio, funzionano nello stesso modo dei sistemi analogici di tensione, tranne per il fatto che dipendono da misure di corrente anziché di tensione.

Una interessante varietà di sistemi analogici di tensione è quella chiamata ad "analogia di ampiezza" - o, più comunemente, a "modulazione di ampiezza". In Fi-

gura 1.18 abbiamo sostituito alla batteria di Figura 1.17 un generatore di corrente alternata.

Ora, il voltmetro oscillerà costantemente, in quanto il generatore produce una tensione alternata, prima alta, con la corrente che va in una direzione, poi bassa, quando la corrente va nell'altra direzione.
Evidentemente, in questo caso non possiamo stabilire un livello di tensione costante, ma possiamo misurare l'altezza, o ampiezza, delle onde.

Facendo variare la resistenza, possiamo far variare l'altezza delle onde, come in Figura 1.19. Così possiamo far sì che le ampiezze prendano il posto dei numeri

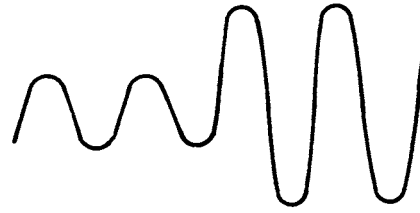


Figura 1.19

che vogliamo trasmettere. Le radio in AM prendono il loro nome dal fatto che funzionano in base al principio della modulazione d'ampiezza.

Un altro metodo analogico è quello della modulazione di frequenza. Questa tecnica è impiegata nelle radio a FM. Esso dipende da onde, come l'AM. Ma, invece di misurare l'altezza delle onde, misuriamo la loro *frequenza*. Onde a FM sono rappresentate in Figura 1.20. Supponiamo che le onde all'estrema sinistra, che sono

Figura 1.20

ravvicinate, rappresentino dieci cilci al secondo (dieci Hertz). E supponiamo che le onde prossime all'estrema destra, dove sono più distanziate, abbiano variato la loro frequenza al valore metà, ossia a cinque Hertz. Ora noi abbiamo rappresentato i numeri dieci e cinque.

Vi sono ancora altri metodi analogici, naturalmente, ma quelli che abbiamo descritto sono di gran lunga i più usati, In breve, possiamo dire che tutti i metodi *analogici* sono basati sulla *regolazione* di varie proprietà dell'elettricità. Per contro, tutti i metodi *digitali* sono basati sulla commutazione dell'elettricità (*aperto-chiuso*).

Nel capitolo seguente vedremo che cosa avviene nei tre rettangoli "sentire", "decidere" e "agire". Prima di andare avanti, però, perché non rispondere ai quesiti

relativi al capitolo 1? Troverete le risposte nelle ultime pagine di questo libro. Rispondendo ai quesiti riportati alla fine di ogni capitolo, potrete accertarvi di aver acquisito le informazioni che vi occorre conoscere per trarre pieno profitto dalle discussioni che seguono.

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 1

1. Tutti i sistemi elettrici ed elettronici sono stati studiati e costruiti per:
   a. Manipolare le informazioni
   ☐ b. Compiere un lavoro
   ☐ c. Fare una delle due cose o entrambe
   ☐ d. Nulla di tutto ciò

2. I tre elementi fondamentali di tutti i sistemi elettrici sono:
   a. Sentire, dettagliare, agire
   ☐ b. Sentire, decidere, agire
   ☐ c. Immettere, agire, emettere
   ☐ d. Sentire, decodificare, agire
   ☐ e. Nulla di tutto ciò

3. Perché l'elettricità compia un lavoro, gli elettroni devono:
   ☐ a. Venir commutati
   ☐ b. Cambiare alternativamente direzione
   ☐ c. Essere di qualità molto buona
   ☐ d. Scorrere da una tensione elettronica più alta ad una più bassa
   ☐ e. Nulla di tutto ciò

4. Tre dei più importanti fattori che controllano il flusso di elettroni in un circuito sono:
   ☐ a. Tensione, corrente e resistenza
   ☐ b. Resistenza, reattanza e corrente
   ☐ c. Tensione, corrente e potenza
   ☐ d. Tensione, forza elettromotrice e corrente
   ☐ e. Nulla di tutto ciò

5. Fra la sorgente di potenza e il punto di utilizzazione, tutto ciò che può accadere all'elettricità è:
   ☐ a. Può cambiare alternativamente direzione
   ☐ b. La sua tensione può cambiare
   ☐ c. Può manipolare le informazioni
   ☐ d. Può venir commutata e regolata
   ☐ e. Nulla di tutto ciò

6. Analogico e digitale si riferiscono ai due modi in cui l'elettricità può:
   ☐ a. Venir commutata
   ☐ b. Venir regolata
   ☐ c. Portare informazioni
   ☐ d. Scorrere come acqua
   ☐ e. Nulla di tutto ciò

7. In codice binario, un "bit" significa:
- ☐ a. 10
- ☐ b. 1
- ☐ c. 1 oppure 0
- ☐ d. 2
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

8. L'energia elettrica sprecata viene dissipata in:
- ☐ a. Vibrazioni
- ☐ b. Calore
- ☐ c. Eccessivo flusso di corrente
- ☐ d. Resistenza
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

9. L'aumento della resistenza in circuito fa sì che il flusso di elettroni
- ☐ a. Diminuisca
- ☐ b. Si arresti
- ☐ c. Acceleri
- ☐ d. Rimanga costante
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

10. La frequenza della corrente alternata è la rapidità con cui la corrente elettrica cambia direzione, e viene misurata in:
- ☐ a. Ampere
- ☐ b. Watt
- ☐ c. Hertz
- ☐ d. Ohm
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 2

Emettitore (regione N) La regione, in un transistore NPN, che emette un numero relativamente grande di elettroni, mentre un numero relativamente piccolo di elettroni viene estratto dalla base (regione P)

Base (regione P) Area, in un transistore NPN, da cui vengono estratti degli elettroni per far scorrere corrente in un circuito.

Collettore (regione N) La regione di un transistore NPN che raccoglie gli elettroni emessi e li fa passare attraverso un conduttore, completando il circuito elettrico.

Circuito di controllo Un circuito a bassa potenza usato per comandare l'elemento commutatore o regolatore in un circuito *di lavoro* a potenza più elevata.

Circuito di lavoro Un circuito che fornisce potenza elettrica a un dispositivo che compie un lavoro o trasmette informazioni.

Amplificatore Sostanzialmente è il nome dato a un transistore o a un circuito che *regola* il flusso di elettroni in contrapposizione con la *commutazione* del flusso.

Modulatore Circuito di tipo amplificatore la cui uscita è una copia delle onde elettriche oscillanti al suo ingresso, tranne per il fatto che l'ampiezza (altezza) delle onde in uscita è modulata (controllata) da un secondo ingresso. (Questo è un modulatore d'ampiezza, e ha la funzione circuitale più importante in un trasmettitore radio in AM).

Oscillatore Ha una funzione circuitale di tipo amplificatore, la cui uscita è una corrente o una tensione regolarmente fluttuante (oscillante).

CAPITOLO 2

FUNZIONI DEI CIRCUITI FONDAMENTALI NEL SISTEMA

Adesso che abbiamo analizzato le caratteristiche comuni di tutti i sistemi, siamo in grado di parlare dei circuiti. Poiché dovremo un po' saltare avanti e indietro fra i vari livelli in cui è organizzato un sistema, mettiamoci chiaramente in mente questi livelli. Il livello organizzativo più alto è il *sistema* (un sistema radar, un televisore, un orologio, una radio); entro ogni sistema vi sono tre *stadi* ("sentire", "decidere", "agire"); entro ogni stadio vi sono uno o più *circuiti* (circuito sintonizzatore, circuito contatore, circuito sensore della luce); entro ogni circuito vi sono uno o più *componenti* (transistori, diodi, raddrizzatori, circuiti integrati, resistenze, condensatori). Così un particolare sistema ha solo tre stadi, ma può avere migliaia di circuiti e milioni di componenti.

Molto di ciò che tratteremo in questo capitolo è basato su un unico fatto che abbiamo appreso nel capitolo precedente: vi sono solo due cose che possono essere fatte all'elettricità fra una sorgente di potenza e un punto di uso - essa può venir commutata o regolata.

Nel primo capitolo, abbiamo discusso alcuni metodi elementari di commutazione e di regolazione. Abbiamo visto che la potenza elettrica può venir regolata da una resistenza variabile. Un tipo comune di resistenza variabile è il potenziometro. Facendo ruotare il perno del potenziometro, possiamo variare il valore della resistenza e così diminuire o aumentare la luminosità di una sorgente luminosa o controllare il volume di una radio. E abbiamo visto come possiamo far uso di un interruttore azionato a mano per trasmettere dei messaggi telegrafici.

Ma è evidente che la commutazione e la regolazione manuale sono totalmente inadatte per l'elettronica moderna. Come potremo costruire un sistema utilizzabile in pratica se ci occorreranno una commutazione ed una regolazione manuale in migliaia di circuiti diversi? La risposta, naturalmente, è che non potremo costruire alcun sistema che sia appena un po' sofisticato. Il grande avvenimento che ha reso possibile l'elettronica moderna è stata l'invenzione del tubo a vuoto o valvola. Esso ha fornito un metodo per controllare la potenza elettrica con mezzi elettrici anziché con metodi meccanici o manuali. Il grande vantaggio della valvola è quello di poter compiere queste operazioni di commutazione e di regolazione ad alta velocità, milioni di volte al secondo.

L'invenzione del transistore, a sua volta, ha apportato dei grandi miglioramenti rispetto alla valvola. Oggi, esso è alla base di tutta l'elettronica moderna. Il transistore compie le stesse funzioni di una valvola: commuta e regola con mezzi elettrici. Nei confronti della valvola, tuttavia, il transistore presenta molti importanti vantaggi: non richiede corrente di filamento, è molto piccolo e leggero, è meccanicamente robusto e di lunga durata, funziona a tensioni opportunamente basse, pur potendo condurre delle correnti relativamente elevate ed ha una affidabilità migliaia di volte

superiore a quella della valvola. Più avanti, esamineremo in dettaglio il transistore e le sue applicazioni, ma, per ora, ci limiteremo a considerare come funzioni base del transistore, le sue capacità di commutazione e di regolazione.

CHE COSA FA LAVORARE OGNI STADIO DI UN SISTEMA?

Ogni stadio di un sistema è composto da uno o più circuiti - di tipo e numero variabile a seconda del fine e della complessità del sistema. Questi circuiti, operanti singolarmente e collettivamente, permettendo al sistema di lavorare nella maniera desiderata. Ed è per mezzo della commutazione e della regolazione che facciamo funzionare i circuiti come richiesto. Per comprendere i circuiti veri e propri, dobbiamo, per prima cosa, vedere come si comporta il loro componente fondamentale, il transistore, e cosa esso fa nel circuito. In Figura 2.1 è indicata la disposizione circuitale più generale, che è anche quella fondamentale. Noterete che si tratta dello stesso circuito usato nel capitolo 1.

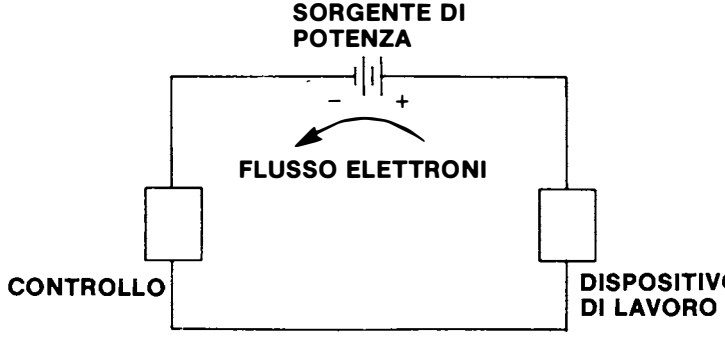


Figura 2.1

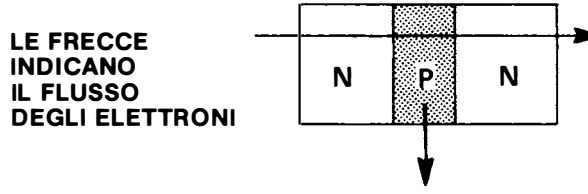


Figura 2.2

Esso ha una sorgente di potenza, un dispositivo di lavoro e un controllo, come abbiamo già visto, è un dispositivo che commuta o regola. Vediamo ora come un transistore possa venir usato come regolatore in questo stesso circuito.

Poiché gli ingegneri elettronici chiamano i transistori del tipo regolatore "amplificatori", d'ora in poi useremo il termine "amplificatore".

Prima di mettere un transistore amplificatore in questo circuito vediamo come un transistore è costruito. Il nocciolo di ogni transistore è un pezzettino di materiale semiconduttore, per lo più germanio o silicio. Come appare dalla sezione di un transistore rappresentata in figura 2.2 il transistore ha subito un processo di lavorazione tale, per cui esso ha tre distinte sezioni, o regioni, di "tipo P" o di "tipo N". Vedremo più avanti cosa s'intende per P e N.

Questo transistore è del tipo NPN. Descriveremo in seguito anche un altro tipo, il PNP. Si può fare agire questo pezzo di materiale semiconduttore come una resistenza variabile o un interruttore. Si può far sì che esso conduca corrente, ne riduca parzialmente il passaggio o lo blocchi interamente.

Vediamo come ciò avvenga, mettendo la sezione del nostro conduttore nello schema base del nostro circuito, come indicato in Figura 2.3. La nostra sorgente di alimentazione è ancora una batteria e supponiamo che il circuito venga utilizzato per alimentare un altoparlante. Colleghiamo allora un microfono alla regione P del transistore.

Fintanto che il microfono non è inserito nel circuito, non succede niente. Il transistore blocca semplicemente il flusso di elettricità diretto dalla batteria all'altoparlante. Per far scorrere la corrente, dobbiamo sottrarre degli elettroni e questa regione centrale, chiamata "base", per permettere alla corrente stessa di scorrere da una regione N all'altra. Quanti più elettroni sottrarremo, tanta più corrente scorrerà. Una delle due regioni N viene chiamata "emettitore", perché, quando estraiamo degli elettroni dalla base, questa regione *emette* degli elettroni attraverso la regione di base. L'altra regione N è chiamata "collettore", perché essa è la regione in cui gli elettroni che scorrono vengono *raccolti*, per poi passare, lungo il filo, all'altoparlante.

Noterete che, in Figura 2.3, abbiamo anche riportato un filo dal microfono all'emettitore del transistore. Abbiamo dovuto far ciò per dare agli elettroni sottratti

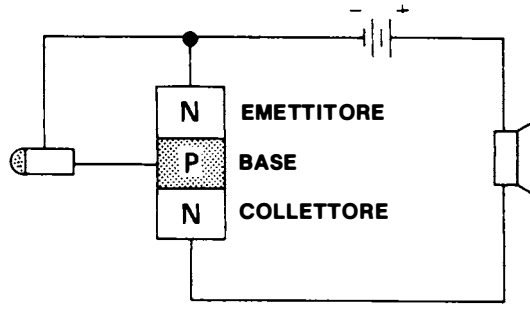


Figura 2.3

dalla base un posto dove andare, facendoli tornare all'emettitore; vi ricorderete che nel capitolo 1 abbiamo detto che l'elettricità scorre in un circuito *solo* se ha qualche posto da cui venire e qualche posto dove andare. Questo filo aggiuntivo ha completato quello che viene chiamato il "circuito di controllo".

Ora che avete ben chiaro il concetto di circuito, possiamo anche adottare dei criteri più professionali e sostituire lo schema della sezione del transistore con il suo simbolo vero e proprio, come abbiamo fatto in Figura 2.4. In questo simbolo, la

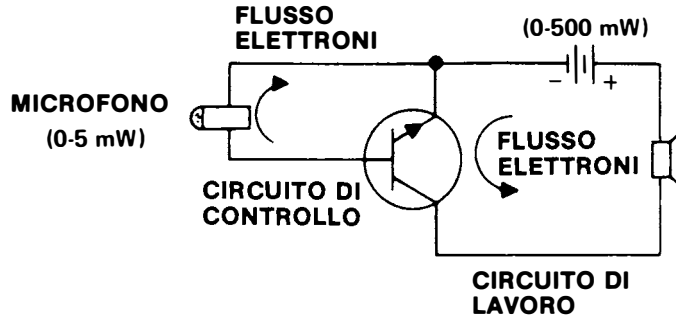


Figura 2.4

linea verticale rappresenta la base, la diagonale semplice rappresenta il collettore e la diagonale con la freccia rappresenta l'emettitore. La freccia dell'emettitore è sempre in senso *opposto* al flusso di elettroni. Il simbolo è completato da un cerchio, ma lo stesso simbolo senza cerchio ha l'identico significato.

IN CHE MODO UN TRANSISTORE FUNZIONA COME AMPLIFICATORE?

Impiegheremo la Figura 2.4 per dimostrare come funziona un transistore amplificatore. Abbiamo detto che una delle straordinarie qualità di un transistore è la sua capacità di controllare la potenza elettrica, con mezzi elettrici. In questo esempio, il controllo elettrico verrà ottenuto per mezzo di un microfono, dispositivo, questo, che può produrre una corrente elettrica fluttuante corrispondente a delle onde sonore fluttuanti. Ma il microfono può produrre solo un esiguo flusso di potenza. Se lo collegassimo *direttamente* ad un altoparlante, probabilmente non sentiremmo alcun suono neppure premendo l'orecchio contro l'altoparlante. Ma, con il semplice circuito che vedete in Figura 2.4, potrete produrre un suono abbastanza forte da svegliare i vicini di casa.

Tanto per dare un'idea, supponiamo che il microfono eroghi una potenza che va da zero a cinque "mW" ("un mW" vuol dire milliwatt, cioé un millesimo di Watt). Ma la potenza prodotta dalla batteria nel circuito *principale* può andare da zero a 500 milliwatt.

Supponiamo ora che un'unica onda sonora colpisca il microfono e dia origine a una potenza resa di tre milliwatt. Il microfono provoca un afflusso di elettroni da una tensione più bassa (regione di base) a una tensione più alta (emettitore). Adesso, per effetto della corrente di base, una corrente relativamente grande scorrerà attraverso la regione di base dall'emettitore al collettore e proseguirà lungo la linea, attraverso la bobina dell'altoparlante. In questo modo, il flusso di corrente nell'altoparlante verrà controllato, o amplificato, in misura esattamente proporzionale al se-

gnale molto minore del microfono. Il segnale che attraversa l'altoparlante potrà avere un valore tipico di 300 milliwatt; ciò significa che i tre milliwatt di potenza prodotti dal microfono sono stati amplificati di cento volte.

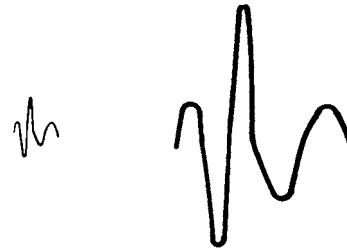


Figura 2.5

Supponiamo ora che una seconda onda sonora colpisca il microfono. Sia essa corrispondente a un suono più debole, tale da produrre una potenza in uscita di due milliwatt. Un minor numero di elettroni scorre nel circuito di controllo, per cui un minor numero di elettroni viene sottratto alla regione di base e, questa volta, il valore della potenza che scorre nel transistore e nell'altoparlante è di solo 200 milliwatt. Ciononostante, essa è stata amplificata di cento volte.

In tutti i casi, fra i valori esistenti nel circuito di controllo e quelli presenti nel circuito di lavoro esiste una buona proporzionalità.

In altre parole, la potenza nel circuito di lavoro sarà sempre, in sostanza, una replica della potenza nel circuito di controllo - ma molto amplificata. Possiamo visualizzare il processo con le tracce di tensione rappresentate in Figura 2.5. Se la traccia prodotta dal microfono si presenta come il minuscolo ghirigoro indicato a sinistra, la traccia del segnale che va dall'altoparlante avrà l'aspetto del grosso ghirigoro indicato a destra - una copia precisa del segnale piccolo, ma molto amplificata.

E' ora il momento di sottolineare una delle caratteristiche del transistore, che lo rende così utile nell'elettronica moderna. Le onde sonore fluttuano molto rapidamente a frequenze che arrivano a circa 30.000 cicli al secondo (30 kilohertz). Il transistore ha la capacità di reagire ad ognuna di queste rapide fluttuazioni. Infatti i transistori ad alta frequenza possono reagire *miliardi* di volte al secondo.

IN CHE MODO UN TRANSISTORE FUNZIONA COME INTERRUTTORE?

Ora che abbiamo visto il transistore nel funzionamento di regolazione o di amplificazione, esaminiamone il funzionamento come interruttore. Impiegheremo ancora una volta un circuito telegrafico come quello rappresentato in Figura 2.6. Ancora una volta, abbiamo una batteria come sorgente di potenza, un cicalino come utilizzatore e un transistore nel circuito di lavoro. Adesso, nel circuito di controllo, abbiamo un interruttore al posto del microfono.

Poichè l'interruttore non può generare potenza, abbiamo una batteria nel circuito di controllo. I resistori a zig-zag nel circuito di controllo rappresentano la resi-

stenza al suono in cento chilometri di filo. Questa resistenza riduce la potenza del circuito di controllo in misura tale che, dopo cento chilometri, non ne rimane abbastanza per azionare il cicalino. Ma la potenza residua fornisce energia sufficiente per azionare un transistore.

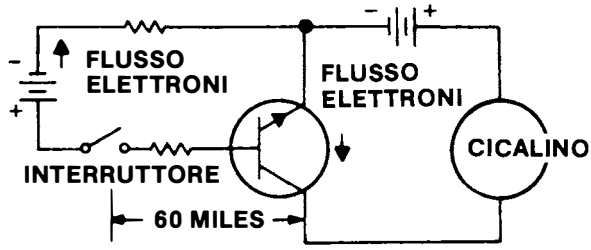


Figura 2.6

Così, quando si schiaccia il tasto del trasmettitore, una piccola corrente di elettroni viene estratta dalla base del transistore una corrente molto maggiore scorre nel circuito di lavoro e il cicalino suona. Questo transistore funziona come un interruttore nel circuito di lavoro.

A questo punto, è il caso di sottolineare un fatto importante relativo ai transistori: ogni transistore ha la capacità di *commutare* la corrente del circuito di lavoro in apertura e in chiusura o di ridurre il flusso ("regolarlo") di questa corrente a valori intermedi fra piena conduzione e interruzione. In altre parole, i transistori sono molto simili ai comuni rubinetti. Potete chiuderli completamente, aprirli completamente o aprirli solo *parzialmente.* Il solo motivo per cui un transistore NPN assomiglia a un interruttore ideale più che a un amplificatore ideale è dato dal fatto che esso ha una certa "tensione di soglia" di pressione degli elettroni, che deve venir prodotta alla base del circuito di controllo in modo che scorra una quantità apprezzabile di corrente (Tratteremo di ciò nel capitolo 7).

Questo dà luogo al quesito: cosa determina se un transistore in un circuito particolare agisce come un interruttore o come un amplificatore? La risposta è che principalmente il circuito di controllo determina ciò". Per esempio, confrontiamo le sezioni di "controllo" del circuito amplificatore in Figura 2.1 e del circuito interruttore, in Figura 2.6. Nel circuito amplificatore, il microfono (purché esso raggiunga la tensione di "soglia") genera una corrente che fluttua dovunque fra lo zero e la piena potenza. Ma nel circuito interruttore, abbiamo invece una batteria e un interruttore. Quando l'interruttore è aperto, il transistore è "interdetto". E quando l'interruttore è chiuso (perchè la batteria raggiunga la tensione di "soglia"), il transistore è in "conduzione". Ciò permette alla corrente di lavoro di scorrere in misura proporzionale alla corrente di controllo permanente e invariabile. (In teoria, scegliamo un transistore che sia "completamente in conduzione" - o, come si suol dire, "in saturazione" - quando scorre questa quantità di corrente). In altre parole, il microfono fa sì che un transistore "regoli" mentre il tasto del trasmettitore e la batteria fanno sì che l'altro transistore "commuti".

Benchè un transistore possa sia commutare che regolare, normalmente esso è costruito in modo da fare una di queste due cose meglio dell'altra. Ne segue che

sentirete parlare di certi transistori, come "commutatori" e di altri, come "amplificatori". Per esempio, dei buoni transistori amplificatori hanno un guadagno di corrente (grado di amplificazione) stabile e moderato. Ma la maggior parte delle applicazioni a commutazione richiede delle elevate velocità di andata in conduzione e all'interdizione e delle basse perdite (questi concetti verranno trattati nel Capitolo 8).
Poiché i calcolatori digitali sono prevalentemente basati su transistori commutatori, potete rendervi conto del grande valore dei transistori nell'elettronica.

COME COMPRENDERE DEI CIRCUITI PIU' COMPLICATI?

La nostra discussione sul circuito amplificatore e sul circuito commutatore si è basata su due circuiti elementari molto semplici. Se li costruiste, trovereste le loro prestazioni deludenti.
Un unico transistore era il solo componente a semiconduttore in ognuno dei due circuiti e voi sapete bene che anche un semplice sistema di questo tipo, come una radio a transistori, contiene almeno sei o sette transistori. Inoltre, voi sapete che un tipico sistema comprende non solo dei transistori, ma anche altri componenti, come diodi, condensatori, resistenze, induttanze ed altri componenti. Il prossimo passo che faremo, è di tornare al circuito fondamentale e renderlo costruttivamente più complesso e sofisticato - in altre parole, più tipico. Per ora, non ci fermeremo a spiegare ognuno dei componenti diversi dai transistori. Ma non vi preoccupate se non potrete comprendere tutti i circuiti man mano che procediamo. L'obiettivo principale, a questo punto, è di arrivare a una valutazione di alcuni dei molti modi in cui i semiconduttori possono funzionare insieme nei circuiti, per produrre i risultati voluti.

Il circuito di Figura 2.7 è un pò più complesso fra tutti quelli finora visti. Tuttavia riconoscere il circuito di lavoro a destra e il circuito di controllo a sinistra è abbastanza facile.
Abbiamo contraddistinto la sorgente di potenza con la lettera "G", che sta per generatore. In realtà, la potenza potrebbe venire da una presa a parete o da celle solari in un satellite. Una sorgente di potenza può essere una qualsiasi cosa che pompi elettroni.
Ci occorre una seconda sorgente di potenza, nel circuito di controllo e abbiamo contrassegnato anche questa con "G" ma, come avete visto in un precedente esempio, essa potrebbe essere un microfono. Abbiamo contrassegnato il nostro dispositivo di lavoro nel punto di utilizzazione con "M", che sta per motore.

Supponiamo di voler regolare la velocità del motore - non da fermo a piena potenza, ma da metà potenza a piena potenza. In altre parole, vogliamo che il motore giri almeno a metà potenza tutto il tempo, anche se non pompiamo nessun elettrone fuori dalla base, grazie al generatore nel circuito di controllo. Per compier ciò, possiamo aggiungere il circuito di controllo e inserire una resistenza di un certo valore; in questo modo, realizziamo un "circuito di polarizzazione" e un numero sufficiente di elettroni verrà sempre estratto dalla base per mantenere il motore a metà velocità. Quindi, quando pomperemo dal generatore di controllo, estrarremo ancora più elettroni, cosicchè la velocità del motore aumenterà al disopra della "metà potenza."

Adesso, aggiungiamo un componente accessorio nel circuito di lavoro. Supponiamo che il generatore produca più corrente di quanta il motore possa portare senza surriscaldarsi. Una resistenza inserita nel circuito di lavoro fra il transistore e il motore o in qualsiasi punto del circuito di lavoro - limiterà la corrente e impedirà il

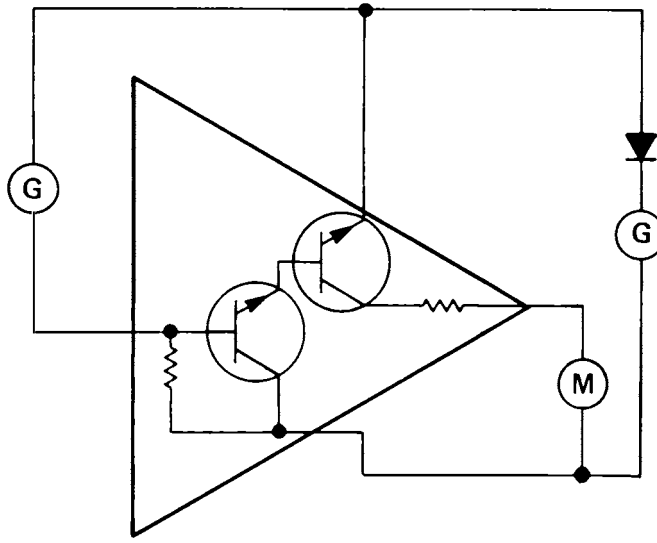


Figura 2.7

surriscaldamento del motore. Supponiamo ancora che il generatore sia un generatore in c.a. ma che il nostro motore sia in c.c. Abbiamo quindi inserito un diodo (rettificatore) nel circuito vicino al generatore. Questo dispositivo permette agli elettroni di scorrere solo in un senso, convertendo la corrente alternata che proviene dal generatore in una corrente continua per il motore. Diremo, per inciso, che la freccia nel simbolo del raddirzzatore è diretta in senso *opposto* al flusso di elettroni.

E, finalmente, supponiamo che il nostro motore sia molto grande. Il nostro transistore di controllo deve, allora, essere di tipo grosso e ad alta potenza per poter portare il forte flusso di corrente. Ma supponiamo che il nostro generatore di controllo non abbia la capacità di prelevare abbastanza elettroni dalla base per azionare il transistore. Usiamo semplicemente un transistore più piccolo, *a bassa potenza,* che *può* venire azionato dal generatore di controllo per primo e facciamo sì che questo transistore, a sua volta, controlli il transistore ad alta potenza. Potete vedere ora come la resistenza di polarizzazione mantenga il transistore più piccolo a metà potenza e come il transistore più piccolo mantenga il transistore di potenza nel circuito di lavoro a metà potenza, per mantenere il motore funzionante a metà potenza anche quando il generatore di controllo non preleva elettroni.

Ancora una volta può essere che non abbiate potuto comprendere completamente questa configurazione circuitale, ma non vi preoccupate, questo è solo un esempio di come i componenti a semiconduttori possano venire impiegati in vari modi per far fronte a svariate condizioni. Abbiamo ancora il funzionamento fondamentale da cui siamo partiti; tutti i circuiti aggiuntivi costituiscono un circuito amplificatore che fa variare la velocità del motore, da metà potenza a piena potenza.

Avvertenza: non costruite questo o qualsiasi altro dei circuiti contenuti in questo libro per un uso effettivo. Questi circuiti sono stati semplificati per scopi didattici e mancano le aggiunte necessarie per farli funzionare bene.

Naturalmente, vi sono molti dispositivi, che non abbiamo ancora menzionato, i quali possono accrescere la complessità della configurazione circuitale. Man mano che verremo a parlarne più avanti, spiegheremo come anch'essi possano venir considerati sotto l'aspetto sia della commutazione che della regolazione. Per esempio, faremo vedere come i thyristori possano venir considerati semplicemente delle combinazioni di transistori. E faremo vedere come i sensori di luce a semiconduttori possano venir fatti sia commutare, che regolare in risposta alla luce.

POSSIAMO SEMPLIFICARE LE NOSTRE ANALISI DEI SISTEMI?

C'è un modo semplice di analizzare i sistemi, che chiameremo il metodo dei "blocchi costitutivi" (o elementari). Si trovano così tanti circuiti, entro ognuno degli stadi dei sistemi relativi al sentire, decidere e agire, che a volte è difficile concludere alcunché da uno schema circuitale completo, che mostri come tutti i componenti di un sistema siano collegati per lavorare insieme. Nell'analisi pratica dei sistemi è, di solito sufficiente pensare i circuiti sotto forma di semplici blocchi costitutivi.

Tornando al nostro circuito di controllo di un motore, per esempio, potremo immaginare tutta la circuiteria contenuta nel grosso triangolo semplicemente come un amplificatore, senza preoccuparci dei vari componenti che entrano in gioco. Infatti, il simbolo, di blocco costitutivo per un amplificatore è un triangolo, come abbiamo indicato in Figura 2.8.

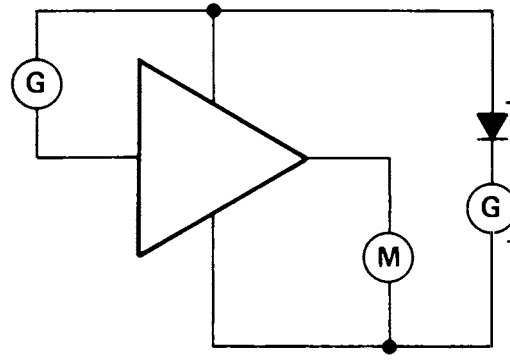


Figura 2.8

Questo circuito è identico al circuito di controllo di un motore rappresentato in Figura 2.7 questo simbolo a forma di triangolo nello schema di un sistema ci dice che abbiamo un amplificatore, che il filo entrante a sinistra è l'ingresso di controllo, che il filo uscente da destra è l'uscita e che le linee in alto e in basso sono l'alimentazione. Questo è tutto ciò che in realtà ci occorre sapere, sempreché abbiamo le prescrizioni relative alle caratteristiche dell'amplificatore. Non dobbiamo preoccuparci della circuiteria *interna*; in pratica, gli schemi a blocchi non la indicano neppure.

Gli schemi circuitali e di sistema vengono semplificati anche in altri modi. Pren-

diamo il circuito in Figura 2.8 per far vedere come si semplificano gli schemi; benché l'applicazione di queste convenzioni al semplice circuito possano apparire una complicazione del medesimo, queste stesse convenzioni semplificano grandemente gli schemi, che possono essere costituiti da centinaia di fili e di componenti. Le linee orizzontali in alto e in basso in Figura 2.8 rappresentano semplicemente i due fili che vanno all'alimentatore G. Nella maggior parte dei sistemi, l'alimentatore produce una tensione costante, poniamo, di 12 Volt. Ciò fornisce una differenza di 12 Volt fra i due collegamenti. Questa differenza potrebbe voler dire 24 Volt da una parte e 12 Volt dall'altra o 18 e 6. Ma, tipicamente, si hanno 12 Volt da una parte e 0 Volt dall'altra.

Tensione zero significa punto elettricamente neutro e questa condizione può essere ottenuta collegando il circuito a massa, cioé a terra. D'altra parte, sugli autocarri, gli aerei ed altri sistemi mobili in cui la terra non è disponibile, il lato a 0 Volt è tipicamente collegato allo chassis o al telaio del sistema. In figura 2.9 sono indicati i simboli di queste connessioni a massa. Il compito del conduttore orizzontale in bas-

Figura 2.9

so, in Figura 2.8, è semplicemente quello di far ritornare gli elettroni, praticamente a 0 Volt, all'alimentatore. Questa funzione può essere compiuta ugualmente bene da un filo, dalla terra o da un telaio.

Similmente, la linea orizzontale superiore è una linea di alimentazione, che viene pure ordinariamente rappresentata da dei simboli. Si fa uso di un cerchietto e del simbolo "$V_{c.c.}$", che sta per tensione di alimentazione.

La Figura 2.10 fa vedere come sarebbe la Figura 2.8 dopo l'applicazione di que-

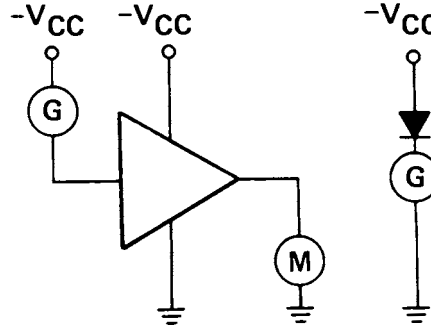


Figura 2.10

ste convenzioni. In molti casi, i collegamenti di alimentazione e di massa ai blocchi

costitutivi possono anche non essere indicati, perché la loro esistenza viene frequentemente sottintesa.

Questa è quindi la tipica forma di uno schema a blocchi del circuito di un motore da cui siamo partiti. Essa ci dice tutto ciò che ci occorre conoscere ai fini di un'analisi del sistema; abbiamo un generatore di segnali che controlla un motore per mezzo di un amplificatore.

QUALI SONO CERTE VARIANTI DELLE FONDAMENTALI FUNZIONI DI AMPLIFICAZIONE?

Oltre al simbolo triangolare di un tipico amplificatore con un'entrata ed un'uscita, potete vedere delle varianti di questo simbolo fondamentale. Gli amplificatori possono essere configurati in modo da amplificare in molti modi speciali. Per esempio, l'amplificatore di Figura 2.11a è chiamato "amplificatore differenziale". Esso ha

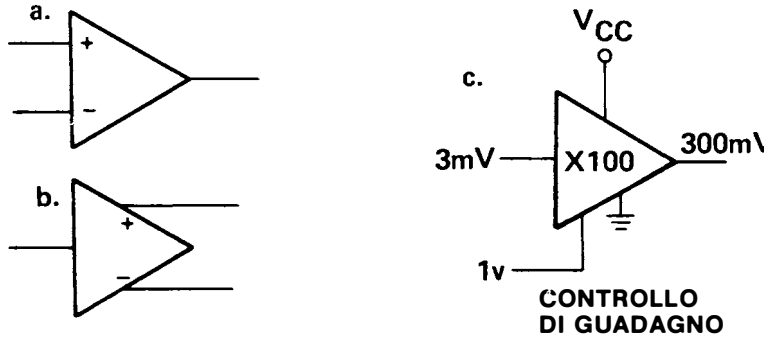


Figura 2.11

due ingressi e l'uscita è un'amplificazione della differenza fra le tensioni ai due ingressi. Certi amplificatori hanno delle *uscite* differenziali, come indicato in Fig. 2.11b; in questo caso, ad un'uscita si ha una tensione alta quando all'altra la tensione diventa bassa.

In Figura 2.11c, oltre ai collegamenti di alimentazione e di massa, si vede un altro filo che va all'amplificatore. Esso viene denominato "controllo di guadagno". Poiché il controllo di guadagno è comune a tanti amplificatori ne parliamo subito. Il "guadagno" è il *rapporto* fra una grandezza *all'uscita* e una grandezza *all'ingresso* di un amplificatore. Per esempio, diremo che il guadagno di tensione di questo amplificatore è 100, in seguito al fatto che la tensione di controllo del guadagno è di 1 Volt. Ciò significa che la tensione in entrata viene amplificata di un fattore 100. Ripensiamo al nostro sistema ad altoparlante, con il microfono che fornisce il segnale di entrata e l'uscita che va all'altoparlante. Supponiamo che un segnale vocale sia in media di 3 millivolt. Allora, la tensione media in uscita sarà di 300 millivolt e produrrà una certa intensità sonora. É qui che entra in gioco il controllo di guadagno. Voi potete regolare un controllo di guadagno in modo che esso faccia variare il guadagno e quindi il segnale in uscita. In un sistema ad altoparlante, pensate che il controllo di guadagno venga regolato dalla manopola del controllo di volume. Ruotando la mano-

pola per ottenere un segnale di 2 Volt il guadagno sale a 200. Il nostro segnale in uscita diventa ora 200 volte 3 millivolt e si ha quindi un suono molto più forte.

QUALI SONO CERTE VARIANTI DELLE FONDAMENTALI FUNZIONI DI COMMUTAZIONE?

Ci sono così tanti tipi di circuiti di commutazione che per essi non vi è un'indicazione schematica, come il triangolo che adoperiamo per un amplificatore. Per il nostro scopo faremo uso di un semplice rettangolo.

Consideriamo la Figura 2.12. Come un amplificatore, un circuito di commutazione, tipicamente, ha un collegamento di alimentazione ed uno di massa. Esso ha

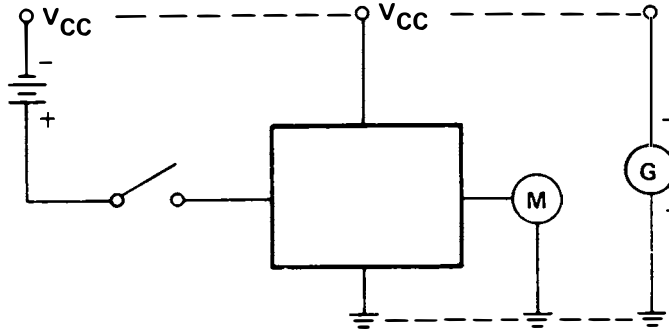


Figura 2.12

inoltre una connessione di uscita che va ad un carico - in questo esempio un motore "M" - con un'altra sua connessione cha va a massa. Abbiamo poi una connessione di entrata a sinistra, in cui la tensione e la corrente sono controllate da una qualunque sorgente di segnale esterna. In questo caso, la nostra sorgente è costituita da un interruttore e da una batteria, con il circuito che si chiude attraverso la tensione di alimentazione. Diciamo, per inciso, che abbiamo seguito, nel disegnare il nostro circuito, la prassi normale, mettendo l'entrata a sinistra, l'uscita a destra, la tensione di alimentazione in alto e i collegamenti di massa in basso.

Ora, qual'è la funzione del blocco costitutivo in Figura 2.12? Bene, il fatto è che senza poter vedere lo schema circuitale interno o l'elenco delle prestazioni caratteristiche del circuito, nessuno lo può dire. Incorrereste nello stesso problema con la maggior parte dei blocchi costitutivi nei sistemi reali - tranne che nel caso degli amplificatori più semplici, che sono adeguatamente rappresentati da un triangolo. Un semplice rettangolo non è sufficiente, da solo, a esprimere cosa fa un circuito.

Per chiarire questo mistero, con riferimento alla Figura 2.12, identifichiamo il rettangolo come un "commutatore invertitore a comando di corrente". Per chi abbia familiarità con questa terminologia, ciò significa che quando si toglie corrente

all'entrata per mezzo del circuito di controllo, si fornisce corrente all'uscita per energizzare il dispositivo di lavoro. Questa funzione potrà venir compiuta, in modo piuttosto elementare e limitato, semplicemente da un transistore NPN, come nel circuito telegrafico di Figura 2.6. Ma, per certe altre applicazioni di commutatori invertitori a comando di corrente, occorrono dei circuiti molto più sofisticati.

I circuiti commutatori si prestano a un gran numero di varianti; dato che la commutazione ha una parte così importante nelle applicazioni digitali, parleremo di queste varianti nel prossimo capitolo per dare un'idea di come i circuiti commutatori possano compiere altre funzioni. Supponiamo di prendere il circuito fondamentale di controllo di un motore rappresentato in Figura 2.12 e aggiungiamogli una *seconda* tensione di alimentazione di 6 V, come indicato in Figura 2.13. L'alimentazione a 12 V è ancora disponibile. Ora, possiamo configurare questo circuito in modo da commutare quanto desiderato, *fra* l'alimentazione a 6 V e quella a 12 V, facendo variare la velocità del motore fra un livello basso ed uno alto.

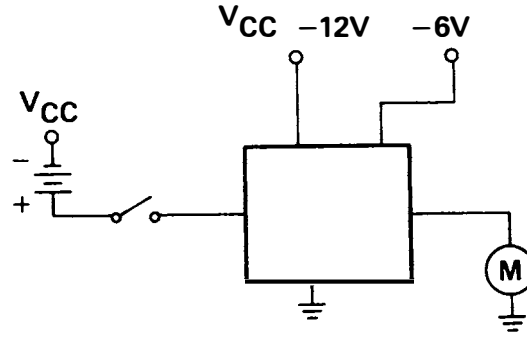


Figura 2.13

OSCILLATORI, MODULATORI ED ALTRI BLOCCHI COSTITUTIVI

Abbiamo detto che i circuiti amplificatori e i circuiti commutatori sono i blocchi costitutivi usati per costruire gli stadi di un sistema. Ma avrete probabilmente sentito parlare di altri tipi di blocchi costitutivi - oscillatori, miscelatori, raddrizzatori, modulatori, rivelatori ed altri ancora. Potrete avere l'impressione che non vi stiamo dicendo tutta la verità e che i circuiti elettronici possono essere così semplici da amplificare e commutare soltanto. In effetti essi lo sono. Anche se abbiamo un gran numero di funzioni che portano nomi diversi, esse possono venir considerate delle *varianti* delle funzioni fondamentali di commutazione e amplificazione.

Prendiamo, per esempio, un oscillatore. La Figura 2.14 raffigura un oscillatore disegnato secondo il criterio dei blocchi costitutivi. Il circuito dell'oscillatore, rappresentato dal rettangolo, ha un collegamento con la tensione di alimentazione,

in alto, un collegamento a massa, in basso, e un'uscita a destra; la corrente e la tensione nella linea di uscita fluttuante in maniera regolare e prevedibile; il segnale in uscita da un oscillatore è tipicamente, una forma d'onda a dente di sega o una sinusoide; si noti che abbiamo indicato entrambe queste forme d'onda.

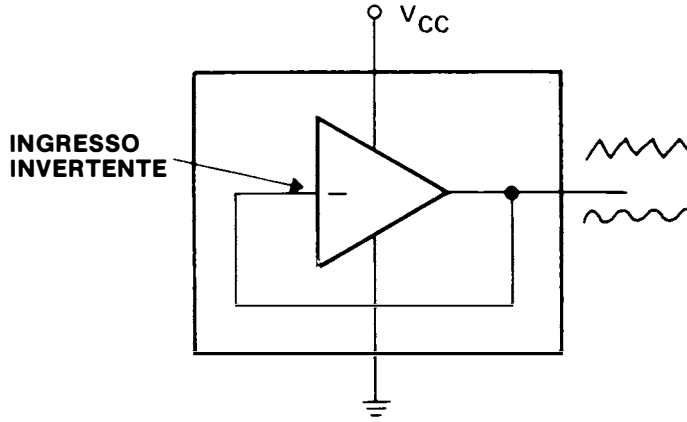


Figura 2.14

Come vengono prodotte tali fluttuazioni regolari? L'oscillatore è costituito da un amplificatore collegato all'alimentazione ed a massa; ma l'uscita è riportata (in reazione) a quella che chiamiamo "ingresso invertente". Ciò significa che l'amplificatore è fatto in modo tale che, quando la tensione in entrata è alta, la tensione in uscita è bassa, e viceversa.

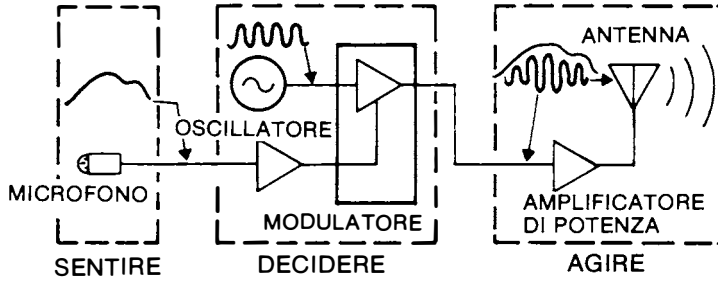


Figura 2.15

Supponiamo di cominciare con la tensione in uscita alta. Questa tensione alta viene riportata all'entrata invertente. In risposta, la tensione in uscita si abbassa. Quando ciò avviene, la tensione bassa viene riportata all'ingresso invertente e l'uscita dell'amplificatore sale di nuovo. Ne risulta una serie di oscillazioni della tensione e della corrente in uscita. La forma delle oscillazioni dipende dalle caratteristiche di progetto dell'amplificatore. In particolare, la forma dipende dal tempo di ritardo fra un segnale in ingresso e la risposta all'uscita dell'oscillatore.

Esaminiamo un altro esempio di funzione circuitale che è una variante dell'amplificatore, cioé il modulatore. Forse saprete già che il modulatore è un circuito molto importante in un radiotrasmettitore in AM. Per spiegare il funzionamento del modulatore, abbiamo disegnato lo schema di un intero sistema radiotrasmittente in Figura 2.15.

Il sistema include un oscillatore come quello che abbiamo descritto. Vediamo ora come vengono messi insieme i blocchi costitutivi.

Supponiamo di diffondere il suono di una voce da un microfono. Il microfono produce delle tensioni e delle correnti fluttuanti, che riproducono l'azione delle onde sonore. Abbiamo mostrato la configurazione delle onde per un breve frammento di discorso, quando esse escono dal microfono sul conduttore. Queste onde elettriche hanno frequenze di circa un kilohertz, - mille cicli al secondo. Ma la produzione di onde radio da parte di un'antenna di radiodiffusione richiede che si produca nell'antenna stessa una corrente alternata a frequenze di circa 1 megahertz - un *milione* di cicli al secondo. Così è evidente che non possiamo semplicemente diffondere le onde prodotte dal microfono.

L'oscillatore di cui abbiamo ora parlato, tuttavia, *può* produrre delle onde ad alta frequenza. Come abbiamo visto, esso produce queste onde in modo ripetitivo regolare. Tutte le onde dell'oscillatore hanno la stessa ampiezza o altezza. Così abbiamo aggiunto un oscillatore al nostro radiotrasmettitore. E per tener presente la sua funzione, abbiamo indicato la configurazione delle onde che esso produce, una serie di onde regolari della stessa ampiezza.

Ovviamente queste onde ripetitive non contengono nessuna delle informazioni che desideriamo trasmettere. E le onde prodotte dal microfono, piene di informazioni, non possono venir radiodiffuse. E' qui che entra in gioco il modulatore. Noi lo abbiamo disegnato come un semplice rettangolo, sottintendendo i collegamenti di alimentazione e di massa. A prescindere da quale circuiteria si trovi entro il rettangolo - sia essa costituita da un circuito integrato o da transistori discreti ed altri componenti cablati insieme, il suo funzionamento sostanziale è quello di un amplificatore. Perciò abbiamo rappresentato la sezione amplificatrice del modulatore per chiarire cosa succede.
L'oscillatore è collegato all'ingresso dell'amplificatore del modulatore. L'uscita del microfono è collegata in modo da controllare il guadagno dell'amplificatore. Ora, la tensione prodotta dal microfono regolerà le onde ad alta frequenza emesse dall'oscillatore. Quando l'onda di tensione prodotta dal microfono è alta, le onde prodotte dall'oscillatore saranno amplificate proporzionalmente. Quando la tensione del microfono è più bassa, le onde emesse dall'oscillatore saranno più basse. In questo modo, le onde emesse dal microfono modulano le onde emesse dall'oscillatore. Il risultato, all'uscita, è costituito da onde che hanno una forma simile a quella dell'onda raffigurata - Queste onde hanno l'alta frequenza dell'oscillatore e l'ampiezza dei segnali provenienti dal microfono. *Esse possono* venir radiodiffuse.

Per completare lo schema, abbiamo aggiunto un amplificatore di potenza per dare al segnale la forte intensità richiesta per la sua radiodiffusione e un'antenna per radiodiffusione.

Il trasmettitore radio può venir prontamente analizzato distinguendo nel sistema gli stadi che compiono le funzioni di "sentire", "decidere", e "agire", come indicato nella figura. Lo stadio del *sentire* è il microfono, che sente le onde sonore in arrivo e converte l'informazione in forma elettrica. All'altro capo del sistema, l'amplificatore di potenza e l'antenna costituiscono lo stadio dell'*agire*, convertendo

l'informazione elettrica a bassa potenza in radioonde ad alta frequenza opportunamente modulate, che si prestano a venir ricevute a distanza. Gli altri blocchi costitutivi intermedi formano lo stadio del *decidere*, che manipola l'informazione come richiesto.

Questa anatomia di un sistema radiotrasmettitore dà un esempio di come gli stadi di un sistema siano composti da blocchi costitutivi chiamati "funzioni circuitali". Essa dimostra che, anche se le funzioni circuitali hanno nomi come "oscillatore" e "modulatore", esse sono in realtà solo delle varianti dell'amplificatore di base. Ancora una volta, abbiamo mostrato che tutte le funzioni circuitali possono venir classificate in tipi amplificatori o in tipi commutatori.

In questo esempio di trasmettitore radio non vi sono circuiti *commutatori*. Nel capitolo che segue, rivolgeremo la nostra attenzione ai dettagli dei circuiti commutatori, dando particolare rilievo ai circuiti logici digitali, la categoria di circuiti che rende possibile la realizzazione dei moderni calcolatori.

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 2

1. Il funzionamento di un transistore è un esempio della funzione fondamentale di tutti i dispositivi semiconduttori, che è:
- ☐ a. Di commutare e regolare il flusso di elettroni
- ☐ b. Troppo complessa da capire
- ☐ c. Di innalzare la tensione del circuito
- ☐ d. Di prelevare elettroni
- ☐ e. Come in c e d.

2. Le tre regioni fondamentali di un transistore sono:
- ☐ a. Collettore, polarizzazione, emettitore
- ☐ b. Emettitore, base, conduttore
- ☐ c. Emettitore, base, collettore
- ☐ d. Catodo, griglia, placca
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

3. Il simbolo di un transistore NPN è:

☐ a.

☐ b.

☐ c.

☐ d.

4. Quando un transistore regola la corrente, si dice che esso "amplifica" la corrente perché:
- ☐ a. Il collettore "raccoglie" elettroni
- ☐ b. La tensione all'emettitore è maggiore della tensione alla base
- ☐ c. La corrente nel circuito di lavoro o di uscita è maggiore della corrente nel circuito di controllo o di ingresso
- ☐ d. Nulla di tutto ciò
- ☐ e. Tutto quanto detto sopra

5. Un transistore può agire come commutatore se è costruito e collegato in modo appropriato; cosicché esso:
- ☐ a. Fornisce un aumento di tensione in uscita, che è direttamente proporzionale al segnale in ingresso
- ☐ b. Permette alla corrente che attraversa il suo emettitore di essere più bassa di quella in uscita
- ☐ c. Permette che la piena potenza scorra nel circuito di lavoro o non permette il passaggio di alcuna corrente nel circuito di lavoro
- ☐ d. Nulla di tutto ciò
- ☐ e. Tutto quanto detto sopra

6. Gli elettroni scorrono attraverso il circuito di lavoro od il circuito di uscita, venendo ad una sorgente di potenza e, tipicamente, ritornando alla sorgente di potenza attraverso:
- ☐ a. Il generatore
- ☐ b. La connessione di base di un transistore
- ☐ c. Un filo che si suppone essere costantemente a tensione zero, chiamato "massa", che spesso è, in realtà, la terra
- ☐ d. Un diodo raddrizzatore che converte la c.a. in c.c.
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

7. A prescindere dal nome dato a un circuito elettrico, esso può venir classificato come:
- ☐ a. Una funzione circuitale di commutazione o una funzione circuitale di amplificazione
- ☐ b. Un circuito di ingresso o un circuito di uscita
- ☐ c. Un modulatore
- ☐ d. Un oscillatore
- ☐ e. Come in a e b

8. I "blocchi costitutivi", in un sistema elettrico, si riferiscono a:
- ☐ a. Un modo di assemblare i circuiti complessi di un montaggio che vengono inseriti insieme come i cubetti nei giochi dei bambini.
- ☐ b. Sezioni del sistema che, ai fini di un'analisi di sistema, possono essere pensate come scatole, con ingressi, uscite e connessioni di alimentazione, senza studiare i dettagli dei circuiti nel loro interno
- ☐ c. Circuiti che sono così "semplici come cubetti per giochi"
- ☐ d. Nulla di tutto ciò

9. Il simbolo a "blocchi costitutivo" di un amplificatore è:
- ☐ a.
- ☐ b.
- ☐ c.
- ☐ d.
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

10. Incontrando una funzione circuitale che non vi è familiare (cioé un blocco costitutivo in un sistema), la prima informazione che dovrete acquisire per comprenderla è:
- ☐ a. Quanti componenti ha il circuito?
- ☐ b. Fa esso uso di c.a. o c.c.?
- ☐ c. Quanto costa il circuito?
- ☐ d. E' un circuito di tipo commutatore o amplificatore?
- ☐ e. Come in b. e c.

11. La caratteristica chiamata "guadagno' si definisce come:
- ☐ a. La differenza fra la tensione di ingresso e la tensione di uscita di un transistore
- ☐ b. Il rapporto fra una grandezza in uscita rispetto alla grandezza in ingresso di un amplificatore
- ☐ c. L'aumento totale di una grandezza in uscita rispetto alla grandezza in ingresso di un amplificatore
- ☐ d. Una grandezza in ingresso a un amplificatore divisa per una grandezza in uscita
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

12. Il flusso di elettroni nel circuito di lavoro passa attraverso un transistore:
- ☐ a. Dalla base all'emettitore
- ☐ b. Dal collettore alla base
- ☐ c. Dal collettore all'emettitore
- ☐ d. Dall'emettitore al collettore
- ☐ e. Dall'emettitore alla base

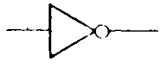
GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 3

Gate Logici (Porte logiche). Blocchi costitutivi a circuito commutatore che utilizzano le istruzioni sì e no come ingressi per render certe delle semplici decisioni, con la risposta anch'essa sotto forma di un sì o di un no.

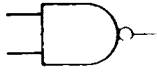
Gate AND (Porta E). L'uscita è sì (1) solo se *tutti* gli ingressi sono sì.

Gate OR (Porta oppure). L'uscita è sì (1) se *anche solo un ingresso* è sì.

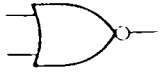
Gate NOT (Porta NON). L'uscita è esattamente *l'opposto* del singolo ingresso.



Gate NAND La porta NAND (Porta NON - E) è un gate AND seguito da un invertitore. L'uscita del gate AND viene invertita nel suo valore opposto.



Gate NOR Il NOR (Porta NON - oppure) è un gate OR seguito da un invertitore. L'uscita del gate OR viene invertita nel suo valore opposto.



Semiaddizionatore (Half-Adder) Esempio di blocco costitutivo usato nei calcolatori digitali. Esso è una semplice combinazione di gate logici, che fa la somma di due bit. La risposta è composta da due bit, chiamati *somma (sun) e riporto (carry).*
Un numero sufficiente di semiconduttori combinati in un blocco costitutivo più grande può sommare due numeri binari di qualsiasi lunghezza.

CAPITOLO 3

COME I CIRCUITI PRENDONO DELLE DECISIONI

La maggior parte di questo capitolo è dedicato alla sezione *decidere* del nostro Sistema Universale. Nel capitolo precedente, abbiamo discusso i circuiti commutatori e amplificatori in modo piuttosto generico e non abbiamo specificato esattamente come questi circuiti si inseriscono nei tre stadi del sentire, decidere e agire. Il fatto è che le *funzioni circuitali* non sentono e non agiscono. Il sentire e l'agire sono compiuti da dei *dispositivi*. Il microfono, per esempio, è un *dispositivo* sensore. Il motore è un *dispositivo* che agisce. In un qualsiasi sistema potrete benissimo trovare dei circuiti commutatori e amplificatori negli stadi che sentono e agiscono, ma essi non compiono la *funzione* nell'uno o nell'altro tipo di stadio. Nello stadio che sente, essi semplicemente traducono l'uscita del dispositivo sensore in qualche forma d'informazione. Nello stadio che agisce, essi forniscono potenza per il dispositivo che agisce, in risposta all'informazione proveniente dallo stadio che decide. Così possiamo dire che i *circuiti* non sentono e che essi non agiscono.

Ma i circuiti commutatori e amplificatori *possono* prendere delle *decisioni*. Ogni giorno, in Italia, in stabilimenti industriali, uffici e centri di calcolo, milioni di decisioni vengono prese da circuiti elettrici, ogni secondo. Queste funzioni circuitali che prendono decisioni sono il cervello del processo *decisionale*.
Questo capitolo esamina come le funzioni circuitali prendono queste decisioni.

Abbiamo già imparato qualcosa circa le decisioni in un sistema elettrico. Sappiamo che esse vengono prese dallo stadio che decide. Esse richiedono l'immissione di informazioni e producono nuove informazioni in uscita. Nel capitolo 1, abbiamo detto che ci sono due modi per ottenere queste informazioni elettriche in entrata e in uscita - il metodo analogico o il metodo digitale. Così possiamo concludere che ci sono due specie di decisoni - le decisioni analogiche e le decisioni digitali.

La maggior parte di questo capitolo ha a che fare con delle decisioni digitali, perché queste sono alquanto più complesse di quelle analogiche e perché esse stanno alla base di tanti pezzi di apparecchiature elettroniche, dai semplici giocattoli ai super-calcolatori. Ma prima di affrontare l'argomento delle decisioni digitali, dovremo parlare brevemente delle decisioni analogiche.

COME PRENDONO DELLE DECISIONI I CIRCUITI AMPLIFICATORI (REGOLATORI)?

Ricordiamo che nel capitolo 1 abbiamo parlato di analogia di tensione, analogia di corrente e analogia di frequenza. Abbiamo visto che si possono escogitare dei

sistemi di codici che impiegano delle differenze in tensione, corrente e frequenza. Prendiamo l'analogia di tensione, per esempio. Noi trasmettiamo delle tensioni variabili ed esse vengono ricevute e registrate a un punto di ricezione. Supponiamo che i livelli di tensione, per una trasmissione, si presentino come in Figura 3.1. Se misuriamo le altezze sulla curva delle tensioni, troveremo che abbiamo prima 5V,

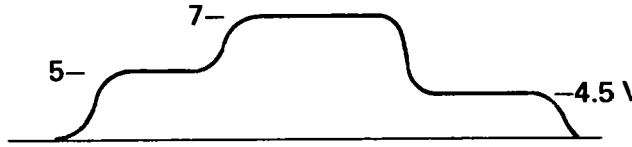


Figura 3.1

poi 7 V e infine 4,5 V. Se avessimo assunto un codice in cui le tensioni rappresentano *direttamente* dei numeri, la nostra trasmissione, in questo caso, darebbe "5-7-4-5". Se invece avessimo preso come codice quello dato dalla *radice quadrata* dei numeri da comunicare, il messaggio si sarebbe dovuto leggere "25-49-20-25".

L'analogia di *corrente* funziona in maniera pressoché uguale, l'unica differenza consiste nel fatto che l'analogia di corrente dipende dalle variazioni di corrente anziché dalle variazioni di tensione. Con lo stesso criterio, l'analogia di *frequenza* trasmette un'informazione basata sulle variazioni di frequenza della corrente alternata.

I metodi analogici vengono usati per molti scopi, oltre che per la trasmissione dei numeri, naturalmente. Il sistema ad altoparlante, visto in precedenza, è un sistema analogico in cui delle tensioni variabili rappresentano la pressione fluttuante dell'aria. I telefoni trasportano le nostre voci con tecniche analogiche e i trasmettitori radio sono anch'essi sei sistemi analogici.

Si vede subito che nei sistemi analogici c'è una trasmissione dell'informazione, ma vengono realmente prese delle decisioni?

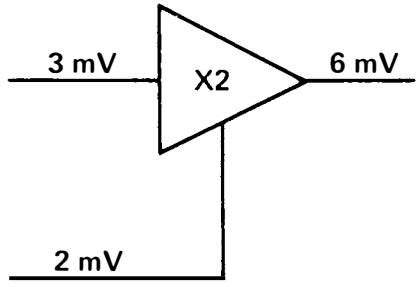


Figura 3.2

Si. In effetti, abbiamo già visto come ciò venga fatto. Ripensiamo al trasmettitore radio. Abbiamo detto che lo stadio che decide è il modulatore, che è un amplificatore.

Il segnale in ingresso è rappresentato da onde di tensione ad alta frequenza, prodotte da un'oscillatore. Un segnale di tensione prodotto dal microfono controlla il guadagno dell'amplificatore. L'amplificatore moltiplica la tensione in ingresso per il guadagno, per produrre la tensione in uscita.

Supponiamo di avere, a un dato istante, una tensione di controllo del guada-

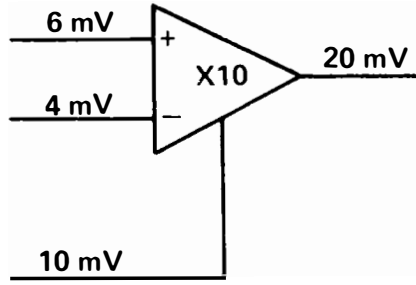


Figura 3.3

gno di 2 millivolt, producente un guadagno di 2. Supponiamo che, nello stesso istante, la tensione in ingresso sia di 3 millivolt. L'uscita, allora, verrà moltiplicata per 2, dando 6 millivolt.

La Figura 3.2 riassume quanto detto a mezzo di uno schema. Questa combinazione di informazioni in entrata per produrre nuove informazioni in uscita è chiaramente, una decisione. Potete vedere che gli amplificatori prendono continuamente delle decisioni.

Prendiamo un amplificatore differenziale. Abbiamo detto che la tensione in uscita da un amplificatore differenziale è un'amplificazione della *differenza* fra le due tensioni in ingresso.

Consideriamo la Figura 3.3 - essa rappresenta un amplificatore differenziale che riceve in ingresso due tensioni, una di 6 millivolt e una di 4 millivolt; esso ha un guadagno fisso di 10. Sei meno 4 è uguale a 2, che, moltiplicato per 10, dà 20; si ha, così, un'uscita di 20 millivolt. Qui abbiamo ancora un esempio di decisione - in questo caso, una decisone che comprende tanto una sottrazione che una moltiplicazione.

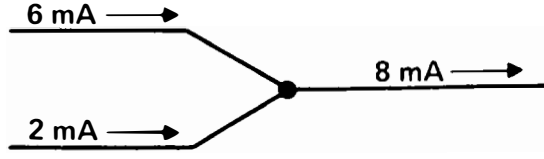


Figura 3.4

In Figura 3.4 è visibile un'addizione fatta con un sistema analogico di corrente. Supponiamo di avere 6 milliampere a un ingresso e 2 milliampere all'altro ingresso.

Per sommare queste due correnti, le facciamo semplicemente affluire in un unico conduttore e misuriamo la corrente risultante, con un amperometro. In questo caso, leggeremo su di esso, 8 milliampere.

Vi sono ancora vari circuiti analogici che eseguono altre operazioni matematiche come la divisione, la ricerca del logaritmo, l'integrazione e la differenziazione. Quando colleghiamo insieme questi circuiti nelle appropriate combinazioni, il risultato è un calcolatore analogico.

Ora che vi siete familiarizzati con le basi elettriche delle decisioni analogiche, il resto è semplicemente una questione di matematica e di configurazione circuitale. La continuazione di questo capitolo sarà dedicata alle decisioni *digitali.*

COME I CIRCUITI COMMUTATORI PRENDONO DELLE DECISIONI?

Consideriamo per un momento il calcolatore digitale, visto che esso è il tipo più sofisticato di sistema digitale. Che cos'è, in un calcolatore, che prende delle decisioni? Sono semplicemente migliaia e migliaia di circuiti commutatori - dei semplici piccoli circuiti che non possono far altro che aprire e chiudere.
Tuttavia, un calcolatore può eseguire delle operazioni matematiche tremendamente complesse a velocità allucinanti. E' evidente che, in un modo o nell'altro, la scienza dei calcolatori ha trovato dei modi di impiego di queste semplci aperture e chiusure di interruttori, per risolvere dei problemi estremamente difficili.

Pensiamo in termini di informazione. Quanto possiamo dire con un interruttore?

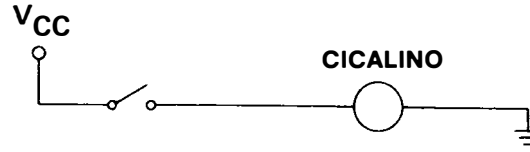


Figura 3.5

La Figura 3.5 mostra il più semplice tipo di circuito, con una sorgente di potenza, un interruttore e un cicalino, con ritorno a massa. Che informazioni possiamo inviare dall'interruttore al cicalino? Possiamo chiudere l'interruttore e permettere all'alta tensione V_{cc} della sorgente di potenza di passare attraverso il filo e far suonare il cicalino. Oppure possiamo aprire l'interruttore e permettere alla tensione nel filo di ritornare a massa, in modo che il cicalino non venga ulteriormente azionato. Questo è tutto ciò che possiamo dire con l'interruttore. Ci dobbiamo limitare a due affermazioni - non più di tanto.

Se il vostro vocabolario dovesse limitarsi a solo due parole, quali parole sceglieresteste? Una persona avveduta sceglierebbe "sì" e "no".
Ve la cavereste meglio con queste due parole che con qualsiasi altre due di vostra scelta. Nei sistemi elettrici digitali, assegnamo lo stesso significato ai due livelli di tensione disponibili, e, normalmente, facciamo corrispondere alla tensione alta il "sì" e alla tensione bassa il "no".

L'informazione digitale si basa su questo semplice principio si-no. Ma esso non è così restrittivo come potrebbe sembrare. Infatti, esso è infinitamente versatile. Vediamo di chiarire questo punto, valendoci di un piccolo esercizio. Il vostro amico pensa ad una carta in un mazzo di carte da gioco. Voi dovete indovinare che carta è. Ma l'altra persona ha la risposta limitata alle sole due parole "si" e "no". Come fare a capire che carta ha scelto il vostro amico? Potrete cominciare facendo semplicemente delle supposizioni a caso. Con delle supposizioni a caso, voi potete indovinare al primo tentativo - o ci vorranno 51 tentativi. Ma facendo uso di un sistema, voi potete garantire che sceglierete la carta giusta facendo non più di 6 domande. Proviamo: il vostro amico pensa al fante di quadri. Voi chiedete: la carta è nera? La risposta è no. Ora sapete che la carta è rossa. Voi chiedete: è un cuori? La risposta è no. Ora voi sapete che la carta è un quadri. Voi chiedete: è minore di 8? La risposta è no. Ora voi sapete che la carta dev'essere superiore o uguale a 8. Voi chiedete: è minore di un fante? La risposta è no. Così la carta dev'essere uguale o superiore a un fante. Voi chiedete: è minore di un re? La risposta è si. Perciò la carta è una regina o un fate. Voi chiedete: è una regina? La risposta è no. La carta dev'essere il fante di quadri.

Così vedete che un'informazione dettagliata può venir comunicata facendo uso delle parole "SI" e "NO" - o detto elettricamente, con una tensione alta o una tensione bassa. Questo, per quanto riguarda l'*informazione*. Adesso, vediamo circa le *decisioni*. Facciamo un esempio di decisione digitale.

Si immagini il sistema di controllo termostatico per un'unità di riscaldamento centrale a gasolio.

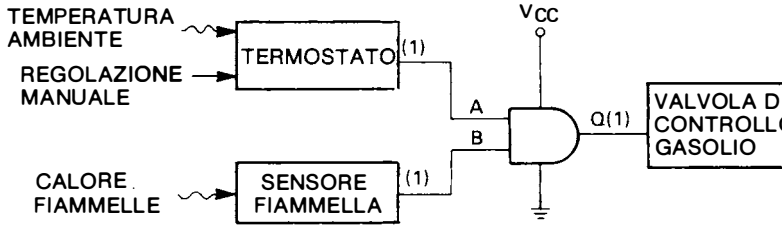


Figura 3.6

Osserviamo la Figura 3.6. Il termostato a parete confronta l'effettiva temperatura ambiente con la temperatura desiderata, il cui valore è stato introdotto nel regolatore. Il filo uscente dal termostato convoglia l'informazione digitale. Una tensione alta vuol dire "si, il locale richiede più calore ".Una tensione bassa vuol dire "no, il locale non richiede calore".Questo segnale è sufficiente a fare aprire o chiudere la valvola del gasolio al momento giusto.

Tuttavia, come fattore di sicurezza, il sistema deve includere un *secondo* flusso d'informazione. Abbiamo bisogno di un sensore di temperature prossimo alla fiammella spia, che determina se questa fiammella è accesa o no, perché da essa dipende l'accensione del bruciatore principale. In un sistema completamente elettrico, l'informazione data da questa funzione rivelatrice sarà o una tensione alta che dice "sì, la fiammella spia è accesa" o una tensione bassa che dice "no, non è accesa".

In base a queste due informazioni in entrata, deve venir presa una decisione. Per ottenere ciò, abbiamo incluso nel nostro sistema completamente elettronico un circuito commutatore che prende decisioni, chiamato "gate logico". Vi sono tre tipi fondamentali di gate logici; quello di cui facciamo uso è un gate AND. Il suo simbolo elettronico è quello indicato in Figura 3.6.
Il gate AND ha un'uscita che va al controllo (o comando) della valvola del gasolio. Se il termostato dice "si, ci occorre calore", e il sensore della spia dice "si, la fiammella spia è accesa", *allora* il gate AND decide "si, aprire la valvola del gasolio". Per contro se abbiamo un "no, all'uno o all'altro di questi ingressi, l'uscita sarà "no". Facendo uso di un gate AND, otteniamo un'uscita *"sì solo se entrambi* gli ingressi sono "sì".

La figura 3.7 riproduce quella che i logici chiamano una "tabella della verità"; essa indica chiaramente e precisamente tutte le possibilità per un gate AND.

Tabella della Verità di un Gate AND

A	B	Q
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Figura 3.7

Abbiamo chiamato i nostri due ingressi A e B e l'uscita Q.La tabella della verità ha tre colonne: una colonna per ogni ingresso e una per l'uscita. Invece di scrivere "sì" e "no" i simboli usuali in logica digitale sono 1 e 0; 1 sta per sì, 0 sta per no. Ricordiamo che noi li usiamo solo come dei *simboli* e non come dei numeri.

Adesso possiamo leggere la tabella. Se l'ingresso A è un uno ("sì") e l'ingresso B è anch'esso un uno ("sì"), abbiamo un'uscita Q di uno ("sì"). Vediamo le altre possibili combinazioni: se A è uno e B è zero, abbiamo un'uscita zero, perchè il gate AND dà "una risposta" "sì" solo quando abbiamo dei "sì" a *entrambi* gli ingressi. Se A è zero e B uno, vale la stessa regola; l'uscita è zero. E, ovviamente, se A e B sono entrambi zero, l'uscita è zero.

La tabella della verità presenta tutte le possibili combinazioni e le decisioni che ne risultano. Voi potete controllare utilizzando la vostra conoscenza del mondo reale. La riga superiore, per esempio, indica che il termostato dice "sì, ci occorre calore" e il sensore dice "sì, la fiammella spia è accesa", per cui la decisione è "sì, aprire il gasolio". Il caso indicato nella seconda riga è che l'ingresso B dice "no, la fiammella spia è spenta", per cui la decisione è "niente calore". Nella terza riga, l'ingresso A dice "no, è abbastanza caldo", per cui la decisione è "niente calore". Il caso dell'ultima riga è ancora più evidente: la casa è abbastanza calda e la fiammella spia in ogni caso è spenta, per cui la decisione è "niente calore".

COME FUNZIONANO I GATE LOGICI?

La maggior parte dei gate logici è costituita da circuiti a semiconduttori, ma si possono anche realizzare dei gate facendo uso di rele' elettromeccanici; poiché

essi sono un pò più facili da capire, useremo questi per chiarire il principio di funzionamento del gate AND. Un relé è un semplice interruttore meccanico che rimane in posizione di aperto finché al suo elettromagnete non venga applicata una tensione che lo faccia chiudere.

Il circuito di Figura 3.8 fa uso di relé. Uno dei relé è energizzato dall'ingresso A e l'altro dall'ingresso B.

Il circuito principale ha un'alimentazione e la sua uscita è Q. Potete vedere come funziona il gate AND. Chiudete soltanto l'interruttore A e l'elettricità non scorrerà, perché l'altro interruttore è aperto. Chiudete B e lasciate aperto A, e ancora non

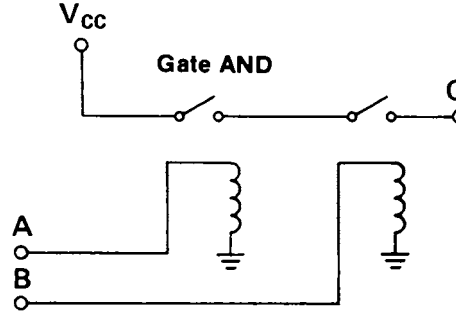


Figura 3.8

scorrerà l'elettricità. Ma chiudeteli entrambi e avrete un segnale "sì" all'uscita. Questo è un semplice esempio di come un circuito elettrico di commutazione possa prendere una decisione digitale.

Vi sono tre gate logici fondamentali: il gate AND, che abbiamo appena visto, il gate OR e il gate NOT. Questi tre gate sono sufficienti per risolvere qualsiasi problema matematico se un numero bastante di essi viene messo insieme nella giusta combinazione. Un pò più avanti, in questo capitolo, faremo vedere come i calcolatori digitali compiono delle operazioni matematiche, facendo uso di questi gate.

Ma, prima di tutto, facciamo conoscenza con gli altri gate logici. In Figura 3.9 è rappresentato un gate OR in versione a relè, insieme con la sua tabella della verità.

Possiamo controllare il suo funzionamento leggendo la tabella della verità. Un gate OR è chiamato così perchè esso dà un'uscita "sì" quando l'uno o l'altro ingresso è "sì". Così, nella tabella della verità, se A è uno e B è uno, Q è uno. Se A è uno B è zero, A è ancora uno. Se A è zero una B è uno, Q è uno. Solo se A è zero e B è zero, Q è zero. Possiamo perciò dire che uno all'una o all'altra dei due ingressi o ad entrambi

gli ingressi dà un'uscita uno. Osservando la versione a relè, è facile vedere come funziona il gate OR. Si chiuda l'interruttore A; l'energia scorre verso Q, o si chiuda l'interruttore B e avviene la stessa cosa, o si chiudano entrambi gli interruttori e accade ancora lo stesso.

Tabella della verità

A	B	Q
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

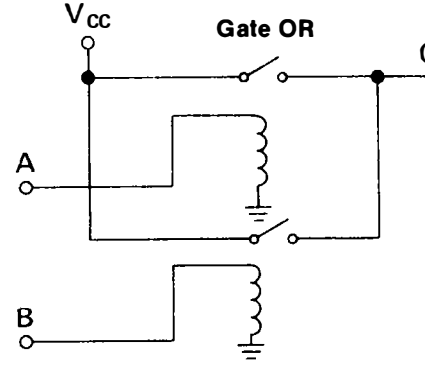


Figura 3.9

Il terzo gate logico fondamentale è il gate NOT, che di solito viene chiamato "invertitore" esso è rappresentato in Figura 3.10. Si noti, al vertice del triangolo,

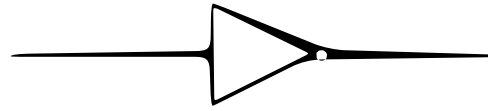


Figura 3.10

il circoletto indicante negazione. Si noti anche che il gate NOT ha solo un ingresso. La funzione del gate NOT è semplice: la sua uscita è sempre *l'opposto* del suo ingresso. Un "sì" all'ingresso dà un "no" all'uscita; un "no" all'ingresso dà un "sì" all'uscita.

Tutti i circuiti logici sono semplicemente delle combinazioni delle tre funzioni fondamentali AND, OR e NOT. Due delle loro possibili *combinazioni* sono così largamente usate che dovremo familiarizzarci anche con essi. In Figura 3.11 è rappresentato il simbolo del gate NAND.

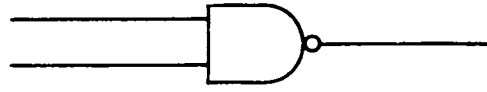


Figura 3.11

Esso è costituito da un gate AND seguito da un invertitore, per cui usiamo il simbolo di un gate AND con, in più, il circoletto che significa NOT. "NAND" significa NOT-AND. Con il gate NAND, se avete degli "uno" ad entrambi gli ingressi, l'uscita "uno" viene invertita in uno zero.

Simile è il gate NOR. Il simbolo, rappresentato in Figura 3.12, è semplicemente l'OR con un circoletto sulla punta. NOR significa NOT-OR.
Esso è costitutito da un gate OR seguito da un invertitore. Così, se abbiamo uno zero e un uno agli ingressi, l'"uno" all'*uscita* viene invertito in zero.

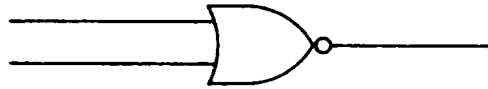


Figura 3.12

Fatta eccezzione per il gate NOT, ciascuno di questi gate può avere più di due ingressi. Se, per esempio, abbiamo tre ingressi a un gate AND, dovremo avere degli uno a tutti e tre gli ingressi per avere uno in uscita. Tre ingressi ad un gate OR, similmente, significheranno che l'uscita è uno se uno qualsiasi dei tre ingressi è uno.

COME VIENE TRASMESSA UN'INFORMAZIONE NUMERICA NEI CIRCUITI ELETTRICI?

Ora che sappiamo come funzionano i gate logici fondamentali, siamo pronti a compiere il passo successivo, consistente nel metterli insieme per risolvere dei problemi matematici complessi. Il passo seguente è di vedere come possiamo trasmettere delle informazioni numeriche facendo uso solo dell'uno e dello zero. In un precedente capitolo, abbiamo brevemente accennato al codice dei numeri binari. Poichè faremo largo uso di questo codice, prendiamolo in esame.

Siano i circoletti in Figura 3.13 presi a rappresentare delle lampadine che possono venire accese e spente singolarmente fornendo una tensione alta o una tensione bassa.

Assegnamo un diverso valore numerico ad ognuna delle lampadine. La prima lampadina a sinistra rappresenta un otto, la seguente un quattro, la seguente ancora un due e l'ultima un uno. Se stabiliamo che una lampadina "inserita", accesa dalla tensione alta, rappresenta sì o uno e una lampadina "disinserita" significhi no o zero, possiamo codificare qualsiasi numero dallo zero al quindici.

8 4 2 1

0 1 0 1 = 5
0 0 1 1 = 3
1 0 0 1 = 9

Figura 3.13

saggio si leggerà così: 0, 1, 0, 1. Leggendo da destra a sinistra, il messaggio dice: "sì, abbiamo un uno; no, abbiamo un due; sì, abbiamo un quattro; no, non abbiamo un otto". Riassumendo il messaggio, abbiamo "uno più quattro" - per cui il numero trasmesso è "cinque".

La riga successiva di Figura 3.13 mostra come trasmettere un *tre*: 0, 0, 1, 1, - "uno più due uguale a tre". E l'ultima riga mostra un nove: 1, 0, 0, 1, che dà "uno più otto uguale a nove".

COME SOMMARE DEI NUMERI BINARI?

Ora che possiamo mettere qualsialsi numero in codice binario, vediamo come si possono sommare i numeri binari. Le regole per sommare delle cifre binarie sono appena un po' differenti da quelle usate nel sistema decimale. Le sole tre possibilità sono indicate in Figura 3.14.

$$\begin{array}{r} 0 \\ +0 \\ \hline 0 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 1 \\ +0 \\ \hline 1 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 1 \\ +1 \\ \hline 10 \end{array}$$

Figura 3.14

Zero più zero è uguale a zero. Uno più zero è uguale a uno. Ma uno più uno, benchè sia uguale a due, dà la *forma binaria* di due, che si scrive "uno-zero"; l'uno viene riportato alla colonna successiva. Come potete vedere, questi calcoli sono abbastanza semplici per poter essere compiuti da gate elettronici.

Adesso possiamo impostare un'addizione come in Figura 3.15. Abbiamo indicato due ingressi; A è uguale a 12, B è uguale a 14.

Sommeremo questi due numeri, ottenendo la somma 26. Abbiamo disposto le cifre binarie in modo da farle cadere nelle colonne che indicano quanto "vale" ognuna. Adesso siamo pronti a fare la somma, cominciando dalla colonna più a destra. Nella

	Colonna Valori	(16)	(8)	(4)	(2)	(1)	
			1				
Ingressi	A		1	1	0	0	= 12
		1	0				
	B		1	1	1	0	= 14
	Somma	1	1	0	1	0	= 26

Figura 3.15

prima colonna a destra, zero più zero è uguale a zero. Nella seconda colonna, zero più uno è uguale a uno. Nella terza, uno più uno è uguale a due, ma lo serviamo in numeri binari come uno-zero; così scriviamo zero nella terza colonna e *riportiamo* l'uno in cima alla quarta colonna.

Nella quarta colonna, abbiamo ora da addizionare tre cifre, cosa che facciamo in due tempi. Nel primo passo, uno più uno è uno-zero, e questo uno viene riportato

nella colonna del "sedici". Nel passo due, lo zero che abbiamo appena ottenuto, sommato con l'uno al disotto di esso, dà uno. Finalmente, l'uno nella colonna del "sedici" viene portato giù come parte della somma.

Adesso abbiamo il risultato: 1, 1, 0, 1, 0. Possiamo interpretarlo così: "sì abbiamo un sedici, sì abbiamo un otto, no non abbiamo un quattro, sì abbiamo un due, no non abbiamo un uno. Il risultato è 16 + 8 + 2 uguale a 26.

Vediamo ora come un calcolatore risolva lo stesso problema facendo uso di gate. Considerando l'intero circuito di figura 3.16 come un blocco costitutivo

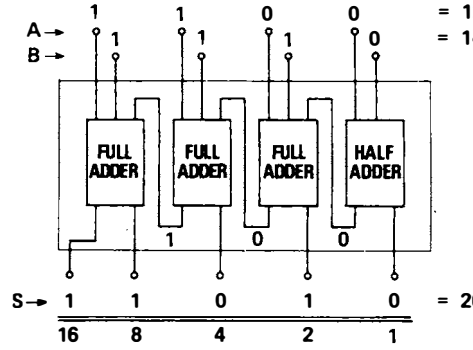


Figura 3.16

abbiamo quattro fili da cui entra il nostro primo numero, il numero A, che è 1, 1, 0, 0, ossia 12 e quattro fili che immettono il nostro numero B, che è 1, 1, 1, 0, ossia 14. Finalmente ci occorrono cinque fili in uscita per la nostra somma, che è 1, 1, 0, 1, 1, ossia 26.

COSA SONO I SEMIADDIZIONATORI E GLI ADDIZIONATORI COMPLETI?

Entro il blocco costitutivo grande vi sono quattro blocchi costitutivi più piccoli chiamati "addizionatori" (adders). Per ogni colonna di addendi, occorre un addizionatore, quello chiamato "semiaddizionatore" (haff-adder) accetta semplicemente le cifre A e B in ingresso; ma gli altri tre addizionatori, chiamati "addizionatori completi" (full-adders), devono sommare non solo A e B, ma anche una cifra binaria (digit), riportata dalla colonna precedente. Ogni addizionatore completo può essere fatto di due semiaddizionatori.

La Figura 3.17 mostra come è costruito il semiaddizionatore; dalla tabella della verità a fianco, si può vedere che esso si attiene alle semplici regole che abbiamo or ora appreso per sommare due cifre binarie. Val la pena di esaminare i quattro casi: quando A è 0 e B è 0, vogliamo una somma di 0 e un riporto di 0. Quando A o B è 1, vogliamo una somma di 1 e un riporto di 0. Quando sia A che B sono 1, ci occorre una somma di 0 e un riporto di 1.

Consideriamo ora come sono interconnessi i gate di Figura 3.17 per produrre questo circuito. Abbiamo due gate AND, un gate OR e un invertitore. Proveremo il circuito, per assicurarci che funzioni nel modo giusto.

A	B	C	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

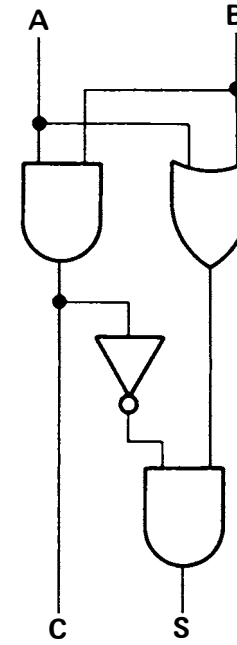


Figura 3.17

Supponiamo di prendere la prima riga della tabella della verità e facciamo la somma 0 più 0. Quando entrambi gli ingressi di un gate OR sono 0, ricorderete che l'uscita è 0. Questo è lo 0 che diventa uno dei segnali in ingresso al gate AND in basso. Nello stesso tempo, entrambi gli 0 vengono immessi nel gate AND. Poichè non abbiamo un 1 ed un 1, l'uscita è 0, per cui il nostro riporto è 0. Ma questo 0 viene anche fatto passare attraverso l'invertitore, che lo converte in un 1, il quale entra nel gate AND in basso. Così, i nostri ingressi al gate AND in basso sono 1 e 0, per cui la somma è 0. Il risultato è che il nostro ingresso di 0 e 0 dà un riporto di 0 e una somma di 0, esattamente come dice che dev'essere la tabella della verità.

Proviamo un'altra combinazione, un 1 e uno 0. Poiché uno degli ingressi al gate OR è 1, l'uscita è 1. Ma poichè gli ingressi al gate AND non sono *entrambi* 1, la *sua* uscita è 0 - per cui il riporto è 0. Questo 0 passa anche attraverso l'invertitore e diventa un ingresso 1 al gate AND in basso. Così, gli ingressi al gate AND in basso sono 1 e 1, e danno una somma di 1. Ancora una volta, il riporto di 0 e la somma di 1 corrispondono alla nostra tabella della verità.

Il caso finale è quello di due ingressi 1 e 1. Poichè almeno uno degli ingressi al gate OR è 1, la sua uscita è anch'essa 1. Così il riporto è 1. Quando questo 1 viene invertito, esso immette uno 0 nel gate AND in basso e, poichè gli ingressi al gate AND in basso non sono *entrambi* 1 e 1, la somma è 0. Così, il riporto di 1 e la somma di 0 soddisfano la tabella della verità.

Potrete ritener necessario di rileggere gli ultimi tre paragrafi e di seguire la logica di Figura 3.17 un passo dopo l'altro, se volete averla ben chiara. Ma se siete convinti che essa funziona in modo soddisfacente, potrete realmente dimenticare i singoli componenti e continuare a considerare il circuito un blocco costitutivo. La sola cosa realmente importante da ricordare è che un circuito cosiffatto riceve gli ingressi A e B ed emette una somma e un riporto.

Questo circuito viene chiamato *semi*addizionatore, perchè gli addizionatori *completi* fanno qualcosa di più. Gli addizionatori completi devono, non solo, accettare gli ingressi A e B ma anche sommare il riporto proveniente dalla colonna precedente. Non c'è bisogno di entrare nei dettagli su come un addizionatore completo sia interconnesso. Pensatelo solo come un blocco costitutivo. Esso produce una somma e un riporto che va all'addizionatore completo seguente. I semiaddizionatori e gli addizionatori completi vengono comunemente prodotti come circuiti integrati standard - blocchi costitutivi per calcolatori.

Dovrà ora esservi chiaro che la Figura 3.17 è, realmente, lo schema della sezione che decide di un "baby computer". E' un circuito molto limitato, ma, comunque, è funzionale, perchè è in grado di sommare due numeri.

Potrete provare voi stessi che questa disposizione funziona, ritornando alla Figura 3.15 in cui abbiamo sommato i numeri manualmente; applicando le stesse semplici regole per l'addizione binaria, potrete seguire lo stesso problema attraverso il baby computer di Figura 3.16

Nella realtà, il circuito piuttosto complesso di Figura 3.16 si può ottenere in un minuscolo blocco costitutivo unico a circuito integrato. La TI lo chiama SN 7483, un addizionatore completo binario a quattro bit. E questo è solo uno delle centinaia di cosiffatti blocchi costitutivi ottenibili come circuiti integrati normali.

Adesso, potete vedere perchè abbiamo dato tanto rilievo al concetto dei blocchi costitutivi. Questo unico circuito integrato contiene più di 300 transistori, resistenze e diodi su un unico chip di silicio. Poche presone possono tenere in mente con chiarezza anche solo un circuito come questo. Fortunatamente, se vi siete impadroniti del concetto dei blocchi costitutivi, avrete un'idea perfettamente chiara di come un calcolatore digitale fa dei calcoli matematici.

Naturalmente, c'è molto più da dire sui calcolatori digitali di quanto abbiamo accennato in questo capitolo. In un capitolo successivo, discuteremo le funzioni di memoria, che implicano dei circuiti integrati come flip-flop, registri e contatori. Ma adesso che sapete come funziona lo stadio che decide di un calcolatore, comprenderete l'essenza del funzionamento di un calcolatore.

Nel prossimo capitolo, prenderemo il baby computer che abbiamo appena costruito e lo metteremo in un sistema completo. Questo esercizio contribuirà a chiarire il concetto che vi siete fatti dell'organizzazione di un sistema.

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 3

1. Rigorosamente parlando, i circuiti di cui un sistema è composto:
   a. Sentono e agiscono, ma non decidono
   ☐ b. Traducono le informazioni, provenienti da un dispositivo sensore, in una forma adatta per prendere una decisione
   ☐ c. Aggiungono potenza all'informazione prodotta dalla sezione che decide per comandare i dispositivi che "agiscono"
   ☐ d. Prendono decisioni
   ☐ e. Come in b, c e d

2. I due tipi di circuiti che prendono decisioni, corrispondenti alla commutazione e alla regolazione dell'elettricità ed alle due categorie di codici per trasmettere informazioni, sono:
   ☐ a. Tipi che sentono e agiscono
   ☐ b. Circuiti a semiconduttori ed a tubi a vuoto
   ☐ c. Digitali ed analogici
   ☐ d. Di informazione e di potenza
   ☐ e. La sorgente e il punto di utilizzazione

3. Il capitolo 3 mette in rilievo una delle due categorie di circuiti decisionali, perchè uno dei più importanti gruppi di semiconduttori è:
   ☐ a. Quello dei transistori amplificatori
   ☐ b. Quello dei circuiti integrati digitali e dei transistori di commutazione
   ☐ c. Quello dei circuiti integrati analogici
   ☐ d. Quello dei circuiti di tipo sensoriale
   ☐ e. Quello dei circuiti di tipo attivo.

4. Il modulatore in un trasmettitoreradio modulato in ampiezza (AM) è un esempio di :
   ☐ a. Decisione digitale
   ☐ b. Come i semiconduttori sostituiscono le valvole
   ☐ c. Come l'amplificazione possa venir considerata un processo decisionale
   ☐ d. Come adattare un radiotrasmettitore per renderlo utilizzabile come circuito moltiplicatore
   ☐ e. Nulla di tutto ciò

5. Le decisioni in un sistema elettrico:
   ☐ a. Implicano sempre dei calcoli matematici eseguiti dai circuiti
   ☐ b. Possono implicare non solo dei numeri, ma anche delle variabili fisiche come la pressione fluttuante dell'aria o perfino le affermazioni "sì" e "no".
   ☐ c. Richiedono sempre dei semiconduttori
   ☐ d. Tutto come sopra
   ☐ e. Nulla di tutto ciò

6. AND, OR, NOT, NAND e NOR sono relativi a:
   ☐ a. I dispositivi analogici
   ☐ b. Il gate logico: il più semplice dei circuiti decisonali
   ☐ c. Le parti di un sistema di controllo di un forno termostatico
   ☐ d. I relè
   ☐ e. Come in a e b

7. Il compito di una tabella della verità è:
- ☐ a. Di essere sigillato entro un gate o una memoria
- ☐ b. Di spiegare la costruzione interna di un circuito logico digitale
- ☐ c. Di aiutare ad analizzare un circuito analogico
- ☐ d. Di provare quale uscita è vera e quale è falsa
- ☐ e. Di presentare in una forma condensata tutte le possibili combinazioni degli ingressi al circuito digitale e le uscite risultanti.

8. Un sistema digitale può prendere qualsiasi decisione logica o matematica:
- ☐ a. Per mezzo di semplici gate logici riuniti in numeri abbastanza grandi e in opportune disposizioni
- ☐ b. Purchè essa possa venir espressa sotto forma binaria (sì-no)
- ☐ c. Facendo uso solo di circuiti del tipo degli amplificatori
- ☐ d. Se si usano abbastanza gate AND
- ☐ e. Come in a e in b

9. Quali sono i più importanti gate logici da cui sono composti tutti i circuiti logici digitali comprendenti alcuni altri gate?
- ☐ a. NAND, NOR, NOT
- ☐ b. AND, OR
- ☐ c. AND, NAND
- ☐ d. OR, NOR
- ☐ e. AND, OR, NOT

10. L'addizionatore a 4 bit binario SN 7483 è:
- ☐ a. Realizzato con dei relè agenti come tre specie di gate logici
- ☐ b. Un blocco costitutivo usato nei sistemi digitali, composto da blocchi costitutivi più piccoli chiamati addizionatori completi e semiaddizionatori ad un bit, che, a loro volta, sono composti da blocchi costitutivi ancora più piccoli, chiamati gate logici, che sono unicamente dei semplici circuiti commutatori.
- ☐ c. Un metodo per sommare un paio di numeri binari a quattro bit per ottenere una somma binaria di cinque bit.
- ☐ d. Composto da più di 300 transistori, resistenze e diodi su un unico minuscolo pezzetto di silicio chiamato "circuito integrato".
- ☐ e. Tutto quanto detto sopra ad eccezzione di a.

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 4

Flip-Flop Blocco costitutivo digitale che, su comando dato da un "impulso di clock" ricevuto ad un ingresso, memorizza (cioè trattiene o ricorda) alla sua uscita un bit d'informazione (1 o 0 logico) ricevuto ad un altro ingresso.

Registro a scorrimento (Shift Register) Blocco costitutivo digitale costituito da un numero qualsivoglia di Flip-Flop collegati in serie con un segnale di clock comune, in modo tale che ad ogni impulso di clock ogni bit di informazione memorizzato si sposta al successivo flip-flop della catena.

Dissipazione di potenza Ogni qualvolta una corrente elettrica scorre da una tensione più alta ad una più bassa - come avviene in un motore, una resistenza o un transistore - una certa quantità di energia (misurata in Watt, cioè Ampere moltiplicati per la caduta di tensione) deve venir erogata. Se questa energia o potenza non viene convertita in lavoro (per esempio da un motore), essa viene "dissipata" - cioè sprecata sotto forma di calore.

Reattanza Proprietà caratteristica di un dispositivo o di un conduttore elettrico che tende a opporsi alle variazioni della corrente che lo attraversa o della tensione ad esso applicata (La "reattanza" determina il modo in cui un circuito "reagisce" a variazioni di corrente o di tensione).

Capacità Una delle cause della reattanza. E' la caratteristica (di un dispositivo o di un conduttore) che tende ad opporsi a variazioni di *tensione* attraverso la "capacità" di questo dispositivo o conduttore di immagazzinare e di liberare elettroni.

Induttanza L'altra causa della reattanza. La caratteristica (di un dispositivo o di un conduttore) che tende a impedire le variazioni nel passaggio della *corrente* attraverso il dispositivo o il conduttore, come se gli elettroni fossero provvisti di inerzia o "intorpiditi".

CAPITOLO 4

RELAZIONI TRA SEMICONDUTTORI E SISTEMI

Nel capitolo precedente abbiamo sviluppato un baby computer e precisato che questo addizionatore completo a quattro bit è contenuto in un unico circuito integrato, l'SN 7483.

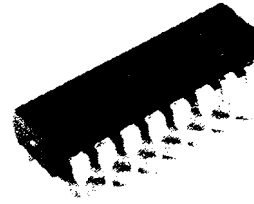


Figura 4.1

La Figura 4.1 rappresenta questo circuito integrato. Noi sappiamo ora che esso può prendere delle decisioni e quindi risolvere dei semplici problemi matematici

Le risposte che esso può dare hanno una precisione infallibile, malgrado la fantastica velocità di funzionamento. Tuttavia, in se stesso, ha un aspetto estremamente innocuo e semplice - cosa che corrisponde alla realtà.

Esso non ha modo di ricevere istruzioni dal mondo esterno. Come gli si può dire quali numeri sommare? Come può comunicare le risposte? Come può ricordare

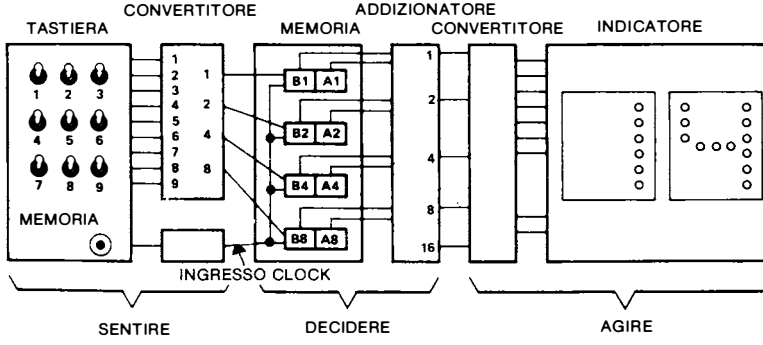


Figura 4.2

(o immagazzinare) i numeri in ingresso, abbastanza a lungo per sommarli? Questo circuito integrato assomiglia molto a un cervello senza corpo. Per poter addirittura funzionare, questo organo destinato a prendere delle decisioni deve venir incorporato in un sistema completo. Vediamo un momento cosa occore per farlo funzionare. La figura 4.2 presenta un sistema completo, comprendente l'addizionatore che abbiamo descritto in dettaglio nel capitolo precedente. Si tratta di un sistema molto semplice e tutto ciò che esso può fare è di sommare due cifre decimali. Ma i principi impiegati sono gli stessi che stanno alla base di un calcolatore elettronico complesso. D'altra parte, la figura potrebbe sembrarvi molto complessa - per cui l'abbiamo suddivisa nei suoi semplici blocchi costitutivi.

Il rettangolo denominato "addizionatore" è il circuito integrato che abbiamo svillupato nell'ultima lezione. Esso accetta, in ingresso, dei numeri binari, li somma e dà, in uscita, la somma, sotto forma di un numero binario.

COME SI PUO' DIRE AL SISTEMA QUALI NUMERI SOMMARE?

Partiamo dall'ingresso del sistema e procediamo attraverso quest'ultimo. La prima cosa che ci occorre è qualcosa che permetta di rilevare i numeri che devono essere sommati. Cosi, facciamo uso di una tastiera, con un tasto (o chiavetta) per ognuna delle cifre da 1 a 9. I tasti sono dei semplici interruttori. Premete uno dei tasti e trasmetterete un segnale "sì" per il numero scelto. Ricordate, però, che ognuno di questi tasti è contrassegnato con un numero *decimale* e che la tastiera sente il vostro comando decimale. Ma l'*addizionatore* fa uso di numeri *binari*.

Così, la prima cosa che il sistema deve fare è di convertire il vostro numero deciale in un numero binario. Supponiamo di azionare il tasto 6. Questa azione produce un segnale "sì" - cioè un'alta tensione nel filo numero 6, che va al blocco seguente.

Questo blocco è chiamato "convertitore decimale-binario".Come il nostro addizionatore, è composto da gate logici. Esso trasforma l'informazione che riceve, attraverso i nove fili provenienti dalla tastiera, mettendola nella forma binaria usata dallo stadio decimale. I segnali uscenti dal convertitore vengono convogliati da quattro fili, che trasmettono la versione binaria dei numeri in ingresso.Come ricorderete, il filo più alto corrisponde a 1, il secondo filo a 2, il terzo a 4 e l'ultimo a 8. Così, quando immettiamo nella tastiera un 6, trasmettiamo dei segnali "sì" attraverso i fili 2 e 4. O anche, in forma binaria, l'uscita è 0,1,1,0. Supponiamo di voler sommare 8 a questo 6. L'8 verrà convertito nella parola binario 1,0,0,0 (è consuetudine leggere nell'ordine "8-4-2-1").

COME PUO' ESSERE MEMORIZZATA QUESTA INFORMAZIONE?

Si presenta ora il quesito: dove va questa informazione? Essa va ad un blocco chiamato "memoria", cioé in un posto dove l'informazione può venir immagazzinata. Perché dobbiamo immagazzinarla?

Perchè non tutti i numeri possono venire immessi nello stesso istante; per cui, dobbiamo conservare il 6, finché non arrivi dalla tastiera l'8 e, solo allora, i due numeri potranno venir sommati. Nel nostro semplice sistema, questa memoria è costituita da solo quattro blocchi costitutivi,chiamati "registri a trasferimento" od a

"scorrimento". Si noti che ogni registro è diviso in due parti o scompartimenti. Questi due scompartimenti sono sufficienti per immagazzinare i due numeri da sommare. Prima che i numeri vengano realmente sommati, le quattro cifre del nostro primo numero vengono memorizzate negli scompartimenti più a destra, contrassegnati con la lettera "A". Il secondo numero da sommare verrà memorizzato negli scompartimenti più a sinistra, contraddistinti con la lettera "B". Ma possiamo introdurre i numeri solo uno alla volta.

Vediamo come avviene questa memorizzazione. I registri a trasferimento, come dice il loro nome, registrano o trattengono l'informazione e poi la trasferiscono. Le due parti del registro a trasferimento, che abbiamo chiamato scompartimenti, sono, in realtà, dei circuiti a commutazione, chiamati "flip-flop".

Vi sono diverse specie di flip-flop e il particolare tipo che abbiamo qui è chiamato "tipo D". I flip-flop vengono usati nei sistemi digitali per una funzione molto importante - quella di *immagazzinare* o *memorizzare* dei dati. Ogni flip-flop può memorizzare un bit d'informazione - un 1 od uno 0.

COME FUNZIONANO I FLIP-FLOP IN UN REGISTRO A SCORRIMENTO?

Ogni flip-flop, nel nostro sistema, ha un ingresso ed un'uscita per le informazioni digitali, più un ingresso di clock, che fornisce un segnale di comando, il quale dice al flip-flop quando deve scattare (Vedi Fig. 4.3). Il comando proveniente dal clock (ritmatore) è un segnale di tensione binario prodotto dal pulsante portante la scritta "memorizza" (store), sulla tastiera. Quando si preme momentaneamente questo pulsante, esso invia un impulso di clock (la tensione di clock sale e poi scende nuovamente) a tutti i flip-flop. Un impulso di clock fa sì che l'uscita di un flip-flop salti (flips) a uno o cada (flops) a 0, a seconda di quale bit si presenta in ingresso. Quando un flip-flop del tipo D riceve un impulso di clock, esso "ricorda" il bit che viene ricevuto all'ingresso in quel momento, memorizzandolo sotto forma di 1 o di 0 e prevedendolo in uscita, sino a che non arrivi l'impulso di clock successivo.

COSA SUCCEDE QUANDO IL FLIP-FLOP VA SU?

La Figura 4.3 indica la successione di eventi in uno dei registri a scorrimento, quando vengono memorizzati due numeri. Consideriamo il registro a scorrimento che memorizza l'informazione proveniente dal filo 4. Supponiamo che questo filo stia ora convogliando un 1. Appena arriva un impulso dal clock, la tensione uscente dal primo flip-flop sale allo stato logico 1. Questa condizione permane - cioè l'uscita rimane a 1 - fintantoché non cambia la tensione in ingresso e il clock non invia un altro impulso di comando.

La nuova tensione in ingresso è uno 0 logico. All'immissione di questo segnale, viene premuto il pulsante "memorizza", che trasmette un altro impulso di clock. E' a questo punto che avviene il trasferimento. Il segnale in ingresso al primo flip-flop è uno 0. L'ingresso del secondo flip-flop e un 1, perchè è questo valore che è memorizzato all'uscita del primo flip-flop. Così, su comando dell'impulso di clock l'1 viene trasferito all'uscita del primo flip-flop. In questo modo, entrambe le cifre desiderate vengono "memorizzate" al loro posto.

Non c'è nulla di misterioso nel funzionamento dei flip-flop. Essi sono semplicemente dei circuiti commutatori riuniti nella combinazione giusta. L'informazione conservata nella memoria viene continuamente trasmessa all'addizionatore, che è

stato spiegato nel capitolo precedente; l'addizionatore decide quant'è la somma e la risposta appare quasi istantaneamente alle sue cinque uscite. Ma l'informazione alle cinque *uscite* è in forma *binaria* e a noi occorre un'*uscita decimale.*

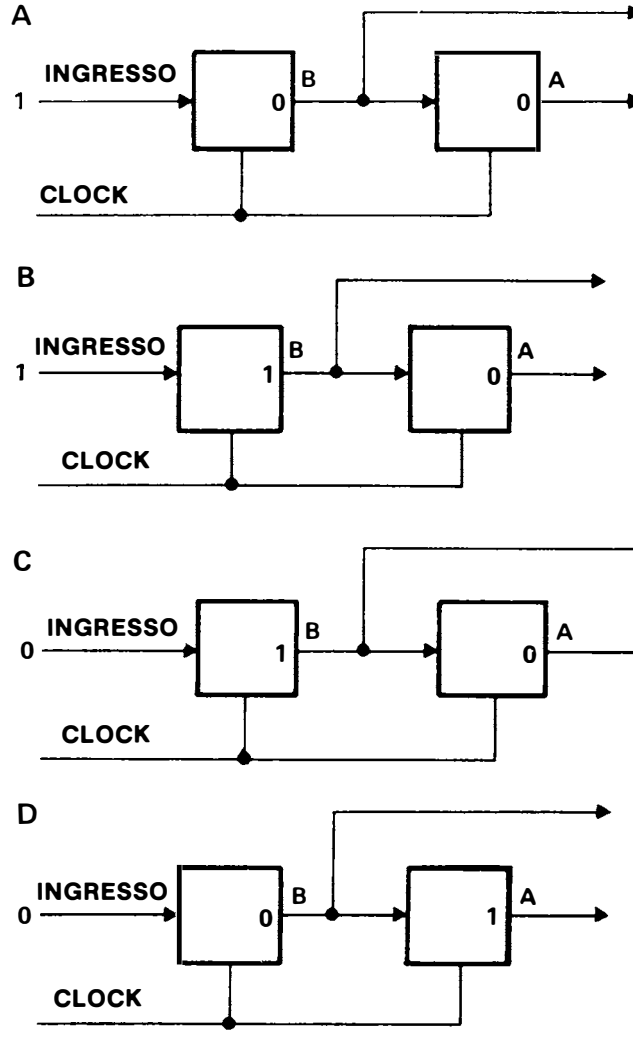


Figura 4.3

Così, la prossima cosa che dobbiamo fare è di riconvertire la risposta binaria a 5 bit in forma decimale. Perciò impieghiamo un altro complesso di gate logici chiamato, abbastanza propriamente, "convertitore binario-decimale". Questo, a sua volta, comanda i dispositivi di visualizzazione.

COME VENGONO VISUALIZZATE LE DECISIONI?

Il compito dello stadio attivo di questo sistema è di visualizzare la risposta proveniente dall'uscita dello stadio decisionale. Vi sono, naturalmente, molti modi di presentare visibilmente un'informazione; così il nostro sistema può azionare delle stampanti che registrano le risposte su carta o far uso di tubi a scarica di gas che danno una presentazione luminosa dei numeri. Ma, nel nostro sistema campione, facciamo uso, diciamo, di diodi a emissione luminosa - cioè di piccole lampadine a semiconduttori - disposti in una matrice, in modo da poter venir accesi selettivamente a formare delle cifre. Essi vengono inseriti al momento giusto dal convertitore di uscita e la risposta appare sul frontale dell'indicatore - nel nostro caso si ha un 14, somma di 6 e di 8.

Così, in Figura 4.2, abbiamo uno schema a blocchi relativo a un sistema completo costruito intorno all'elemento decisionale che abbiamo analizzato nel capitolo precedente. Come potete vedere, è un sistema completo, con stadi sensori, decisionali e attivi. Naturalmente, si tratta di un sistema piccolo - un progetto potrebbe probabilmente metterlo tutto in un contenitore dalle dimensioni di un pacchetto di sigarette - ma adesso potete dire di avere analizzato un sistema elettronico completo. E in questo semplice sistema abbiamo visto tutte le parti essenziali che entrano anche nel calcolatore più grande del mondo - ingresso, uscita, elaborazione e memoria. Questo è il massimo a cui ci spingeremo nella nostra discussione sull'organizzazione dei sistemi. Adesso, siamo pronti a vedere come i semiconduttori si possono inserire nei sistemi.

IN CHE MODO DIFFERISCONO I SISTEMI UNO DALL'ALTRO?

Abbiamo indicato le caratteristiche fondamentali comuni a tutti i sistemi elettronici. Ma, dopotutto, i sistemi non sono tutti simili. E' vero che tutti i sistemi *possono* venir suddivisi negli stadi sensori, decisionali e attivi. E tutti i sistemi o *manipolano* le informazioni o *lavorano*. Ciononostante, i sistemi differiscono uno dall'altro e queste differenze hanno un influsso ben definito sulla scelta dei tipi di semiconduttori che entrano in essi.

Per chiarire queste differenze, confrontiamo il nostro sistema addizionatore di Figura 4.2 con il sistema radar rappresentato in Figura 4.4.

Il funzionamento del radar viene controllato da un'unità centrale, che possiamo chiamare lo stadio decisionale. Esso risponde agli ordini provenienti dalla centrale di controllo, che ha una funzione rivelatrice - in altre parole si ha un'immissione di informazioni. Ed abbiamo un indicatore radar, un visualizzatore dell'informazione nella forma desiderata. Lo stadio attivo contiene poi un trasmettitore radio con un'antenna direzionale, per trasmettere degli impulsi di onde radio su comando dello stadio decisionale.

Potete rapidamente riconoscere le somiglianze fra i due sistemi. Ma potete anche riconoscere le differenze fra essi. Elenchiamo le differenze; la differenza più evidente è una di cui abbiamo già parlato: la macchina addizionatrice fa uso di informazioni digitali e il radar, come la gran parte delle apparecchiature radio, usa informazioni analogiche. E, a causa di questa differenza nel modo di usare l'informazione, noterete anche che il radar contiene principalmente dei circuiti amplificatori e dei semiconduttori di tipo amplificatore, mentre l'addizionatore impiega dei circuiti a commutazione e dei semiconduttori di tipo commutatori.

Per di più, la trasmissione radio, come abbiamo visto, si basa su dei segnali di frequenza relativamente elevata - mentre i sistemi digitali funzionano molto bene a frequenze relativamente basse. Infine la maggior differenza è che i sistemi digitali richiedono solo abbastanza potenza per commutare i circuiti; per contro, il sistema

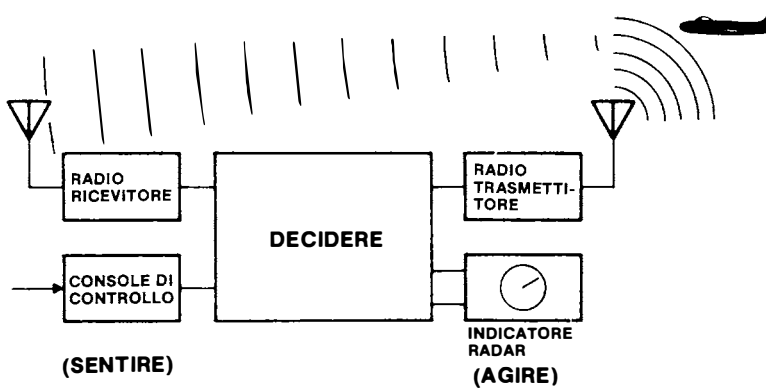


Figura 4.4

radar necessita di un forte impulso radio, capace di propagarsi a molti chilometri di distanza e di produrre una riflessione abbastanza forte per ritornare indietro e venir rivelato. Nei moderni sistemi radar, ciò significa semiconduttori di potenza nello stadio trasmettitore.

Riassumiamo queste differenze:

Addizionatrice	**Sistema radar**
- Fa uso di informazioni digitali	- Fa uso di informazioni analogiche
- Fa uso di circuiti di commutazione e di semiconduttori di tipo commutatori	- Fa uso di circuiti amplificatori
- Bassa frequenza	- Alta frequenza
- Bassa potenza	- Alta potenza

Dovremo inoltre tener presente che le differenze qui elencate possono esistere *entro* lo stesso sistema. Consideriamo di nuovo il radar. Benchè il radioricevitore e il radiotrasmettitore facciano uso di informazioni analogiche, altre parti del sistema, come lo stadio decisionale, possono impiegare informazioni digitali. Per di più, si troveranno circuiti ad alta frequenza solo nelle due sezioni radio. E non tutte le parti di questo sistema richiedono potenza elevata; la sezione decisionale, certamente, non la richiede e la console di comando probabilmente neppure.

E' quindi evidente che le funzioni, variabili da un sistema all'altro ed anche entro uno stesso sistema, richiedono diverse specie di semiconduttori. E vi sono, naturalmente, molte prescrizioni particolari, ma importanti, che inducono un progettista a scegliere un dispositivo piuttosto di un altro, per ogni funzione. Malgrado ciò, è utile dividere tutti i semiconduttori in poche ma estese categorie per chiarirci le idee.

QUALI SONO LE PRINCIPALI CATEGORIE DI SEMICONDUTTORI?

La Figura 4.5 presenta un "albero genealogico" che abbraccia tutti i semiconduttori. La base per la loro suddivisione nelle diverse categorie è data dalle loro ap-

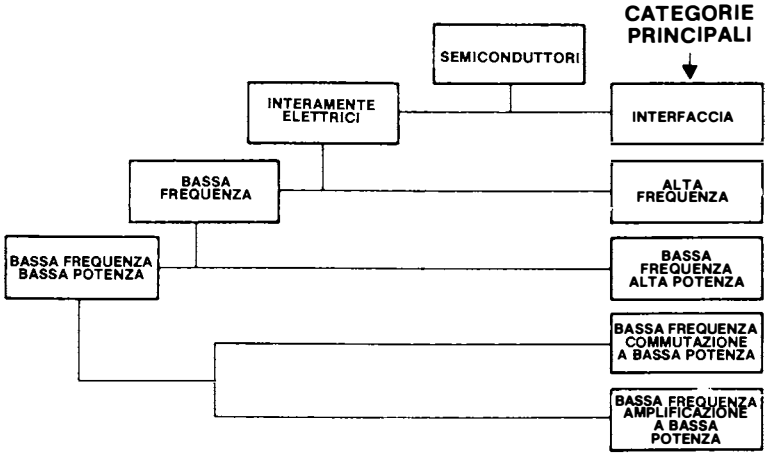


Figura 4.5

applicazioni nei sistemi. Partendo dall'alto, cominciamo con tutti i semiconduttori. Essi possono venir divisi in dispositivi di "interfaccia" e dispositivi "puramente elettronici". I "dispositivi di interfaccia "costituiscono una categoria, invero relativamente piccola, principalmente composta (al momento in cui scriviamo) dai dispositivi elettronici come i sensori di luce e gli emettitori di luce. I dispositivi elettronici come i sensori di luce e gli emettitori di luce. I dispositivi d'interfaccia sono la sola specie di semiconduttori che, realmente, si interfacciano con il mondo esterno - altri semiconduttori si interfacciano solo con altri dispositivi elettrici o elettronici.

Il termine piuttosto vago "puramente elettronici" abbraccia la grande maggioranza dei semiconduttori. Essi si dividono in due gruppi. Ricorderete che la frequenza costituisce una delle maggiori differenze fra l'addizionatore e il sistema radar. Così possiamo stabilire una suddivisione fra quelli a "bassa frequenza" e quelli ad "alta frequenza".

Un'ulteriore suddivisione dei semiconduttori a bassa frequenza è fatta in base alla potenza. Così, abbiamo "bassa frequenza e bassa potenza" e "bassa frequenza e alta potenza".

Infine, i semiconduttori a bassa frequenza e bassa potenza possono esser suddivisi in due categorie, a seconda che essi siano commutatori o amplificatori. Il risultato finale della ramificazione del nostro albero genealogico è che possiamo collocare ogni transistore in una delle cinque larghe categorie rappresentate nella colonna di destra dell'albero

Prima di andare oltre, tenete presente che la categoria ad alta frequenza comprende tanto i tipi ad alta potenza che quelli a bassa potenza, ma a prescindere dalla potenza, tutti i circuiti e i dispositivi ad alta frequenza hanno delle caratteristiche comuni, che li distinguono dai tipi a bassa frequenza. Tenete inoltre presente che la categoria a bassa frequenza e alta potenza comprende tanto i circuiti e i dispositivi commutatori, quanto quelli amplificatori.

Per fissare fermamente nella memoria questa classificazione, man mano che discuteremo i dispositivi tipici compresi in ognuna di queste cartegorie, potrete riferirvi ancora alla Figura 4.5

QUALI SONO ALCUNI TIPICI DISPOSITIVI DI INTERFACCIA?

Possiamo definire dispositivi di interfaccia quei dispositivi che sono sensibili all'energia esterna o che la producono.

Un tipico dispositivo d'interfaccia è il resistore Sensitor®. Questo dispositivo non è, effettivamente, un semiconduttore, ma uno speciale tipo di resistore al silicio, la cui resistenza varia con la temperatura; esso quindi, può rilevare l'energia esterna del calore e trasmettere elettronicamente questa informazione.

I dispositivi opto-elettronici sono dei veri semiconduttori. In Figura 4.6 è stato riportato il simbolo elettrico, di un fototransistore.

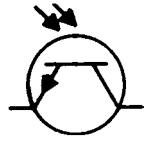


Figura 4.6

Si noti che esso ha un terminale di emettitore e un terminale di collettore, proprio come un comune transistore, ma nessuna connessione elettrica alla regione di base dell'elemento semiconduttore. L'energia contenuta nella luce esterna passa, invece, attraverso una piccola finestratura, o lente, applicata alla custodia del semiconduttore e genera quella che equivale a una corrente di base, per portare in conduzione il transistore.

In Figura 4.7 si vedono alcuni tipici diodi a emessione luminosa (abbreviati LED). Questi funzionano in modo molto simile a delle minuscole lampadine conver-

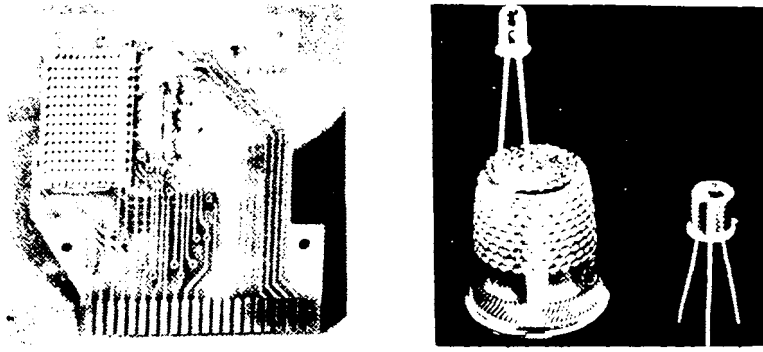


Figura 4.7

tenti l'energia elettrica in luce visibile. Gli emettitori di luce vengono spesso usati in complessi a schiera, o matrici, coma quella riprodotta in Figura 4.7, con cui è possibile dare una presentazione visiva di lettere o di numeri - ricorderete che abbiamo usato un tale tipo di indicatore nel nostro baby computer. Fra i vantaggi dei LED rispetto alle altre sorgenti luminose vi sono quelli rappresentati dal fatto di essere molto compatti, di usare poca potenza, di produrre poco calore e di avere una vita quasi eterna.

In seguito discuteremo più diffusamente dei dispositivi elettronici. Per il momento, tutto ciò che dobbiamo sapere è che i sensori di luce convertono la luce in segnali elettrici e gli emettitori di luce convertono l'energia elettrica in luce.

CHE IMPORTANZA HA LA POTENZA NEI CIRCUITI E NEI SEMICONDUTTORI?

Una delle principali caratteristiche dei semiconduttori e di molti altri dispositivi elettrici è la quantità di potenza che essi possono dissipare. In parole povere, "dissipazione di potenza" significa il calore che viene generato entro un dispositivo dall'"attrito" degli elettroni che corrono attraverso il dispositivo stesso. Paragoniamo il dispositivo e la corrente elettrica a una fune, in movimento, stretta dalla vostra mano. La vostra mano si riscalderà per l'attrito - per effetto del quale una certa parte della potenza applicata alla fune in moto viene dissipata (il che significa sprecata) sotto forma di calore. Dissipare potenza, significa sprecarla, attraverso un processo che richiama l'attrito, per conversione in calore.

Se il calore viene generato troppo rapidamente entro un dispositivo (cioè più velocemente di quanto avvenga la sua rimozione attraverso il telaio o l'aria), esso si accumula nel dispositivo facendo crescere la temperatura. Temperature eccessive provocano disfunzioni nel dispositivo o anche la sua completa distruzione ("bruciatura"). La potenza dissipata nominale (power dissipation rating) di un dispositivo indica la rapidità con la quale può venire generato del calore dentro il dispositivo stesso, senza danneggiarlo. Questa velocità nella generazione del calore si misura in watt o in milliwatt, che sono unità di potenza. Si costruiscono dei semiconduttori che possono sopportare solo pochi milliwatt di calore, altri che possono sopportare vari watt ed altri ancora che possono assorbire centinaia di watt. Non c'è una precisa linea di separazione fra i dispositivi a "bassa potenza" e quelli ad "alta poten-

za" (come indicato nell'"albero genealogico" di Figura 4.5), ma, in pratica, la linea di demarcatura viene generalmente stabilita a circa un watt di potenza dissipata.

Benchè la potenza *dissipata* da un dispositivo non sia uguale alla potenza *trasmessa* dall'elettricità *attraverso* il dispositivo, vi è una relazione ben definita fra queste due grandezze. Pensiamo di nuovo alla vostra mano mentre stringe una fune che si muove.

Due sono i fattori che producono il calore - la velocità della fune (equivalente alla corrente elettrica) e lo sforzo di trazione che voi esercitate sulla fune stringendola più forte (equivalente alla pressione di tensione applicata al dispositivo - cioè alla differenza fra le tensioni esistenti da una parte e dall'altra di esso). Quanto più è veloce la fune e quanto più è stretta la vostra presa, tanto più si riscalda la vostra mano. Analogamente, quanto più grande è la corrente e quanto è maggiore la caduta di tensione, tanto maggiore è la potenza dissipata. Detto semplicemente: *ampere per volt uguale watt.*

Facciamo un esempio. Quello di Figura 4.8 è un semplice circuito di controllo di un motore. Abbiamo un'alimentazione a 12 V, un transistore amplificatore NPN,

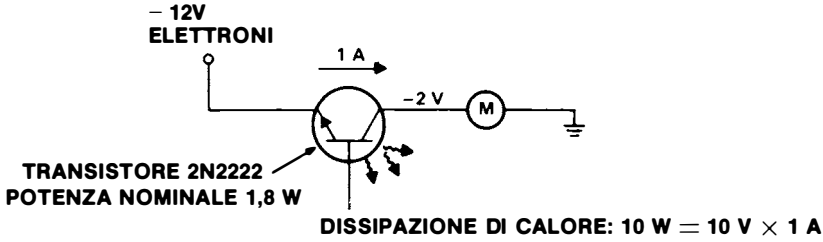


Figura 4.8

un motore e una massa. L'alimentatore fornisce 12 V di pressione elettronica. Supponiamo di prelevare dalla base del transistore solo il numero di elettroni sufficiente a permettere che dall'emettitore al collettore scorra una corrente di un Ampere. Supponiamo, inoltre, che ciò basti per mantenere una tensione di 2 V nel filo che va al motore.

La potenza dissipata in questo transitore è la potenza sperperata come calore nel processo di regolazione. Pensate questo calore come dei Watt di potenza. Possiamo calcolare la potenza perduta moltiplicando la caduta di tensione ai capi del transistore per la corrente che lo attraversa. Poiché a un capo del transistore abbiamo 12 V e all'altro capo 2 V, la caduta di tensione è di 10 V. Moltiplichiamo un ampere per 10 V e avremo 10 W.

Ma, in base ai "data sheet" del catalogo, la potenza dissipata nominale di questo transistore è di soli 1,8 W. Cosa succede quando generiamo in esso 10 W? Tutta questa potenza deve scorrere entro un minuscolo chip di silicio e in questo chip si genera del calore. Quanto più piccolo è il chip, tanto più esso si riscalda. Quando la temperatura del silicio cresce oltre i 200 gradi centigradi circa o la temperatura del germanio cresce oltre i 100°C circa, perdiamo il controllo del transistore. Esso va in piena conduzione e rimane in questo stato. Ben presto si arriverà così alla sua distruzione. In breve, questo transistore è un dispositivo a potenza relativamente bassa (un dispositivo per segnali piccoli), che non si dovrebbe usare in questo circuito.

Così, che genere di transistore ci occorre per funzionare in modo appropriato in questo circuito? Per prima cosa, nel dispositivo, ci occorre un chip di materiale semiconduttore più grosso.
Ciò renderà il calore meno concentrato, cosicché la temperatura rimarrà più bassa. In secondo luogo, ci occorre un miglior contatto fra il chip e la custodia. Ciò ridurrà l'isolamento termico, così il calore potrà defluire più prontamente dal chip. In terzo luogo, ci occorre una custodia più grande e quindi un'area maggiore, per il trasferimento del calore all'aria circostante o alla piastra su cui è montato il dispositivo. Il dispositivo di potenza ha un chip grosso, una custodia grossa e dei terminali di maggior spessore, per portare più corrente. Spesso, come nel caso del dispositivo qui riportato, i dispositivi di potenza hanno incorporato un bullone prigioniero - chiamato "stud" (perno) - così da poter essere montati ad accoppiamento stretto sul telaio o su un dissipatore di calore di grandi dimensioni. Oltre a ciò, essi sono spesso raffreddati da speciali soffiatori d'aria o anche da una circolazione d'acqua.

In Figura 4.9 è rappresentato un dispositivo per piccoli segnali con, accanto, un dispositivo di potenza. Le differenze sono evidenti.

Figura 4.9

Il dispositivo di potenza riportato in Figura 4.9 può dissipare fino a 50 W, valore più che sufficiente per lasciare un largo margine di sicurezza al nostro circuito.

Vi chiederete: "perché non costruire tutti i dispositivi in modo da portare una potenza elevata? Non avremmo così da preoccuparci delle disfunzioni causate dal calore". La risposta è che, in primo luogo, essi sarebbero troppo grossi. Consideriamo l'addizionatore completo binario che abbiamo costruito per il nostro baby computer. Esso contiene circa 100 transistori - tutti i dispositivi a potenza molto bassi. Immaginiamo di costruire questa stessa funzione facendo uso di transistori e di circuiti di potenza. Invece di una funzione grande come un pacchetto di sigarette, si finirebbe con l'averne una grande come una scatola da scarpe. Inoltre, essa genererebbe tanto calore quanto un ferro da stiro, per cui richiederebbe un qualche sistema speciale di raffreddamento. Peggio ancora, commuterebbe a velocità molto bassa, per cui non sarebbe pratico per applicazioni nei calcolatori.

Per di più, sarebbe dispendioso in modo proibitivo. In conclusione, vi sono delle ragioni ben precise per catalogare i semiconduttori di potenza, come un gruppo a sé.

I semiconduttori di potenza si distinguono, non solo, per il loro aspetto e per la potenza nominale, naturalmente, ma anche per le loro applicazioni. Li si trova principalmente nello stadio "attivo" dei sistemi, dove essi commutano e regolano la potenza che comanda i dispositivi di lavoro.

Prima di abbandonare l'argomento dei dispositivi di potenza, dobbiamo far notare che queste caratteristiche distintive si applicano non solo ai transistori, ma anche agli altri tipi di semiconduttori, come diodi e i thyristori.

IN CHE MODO LA FREQUENZA INFLUISCE SUI CIRCUITI E SUI SEMICONDUTTORI?

Prima di tutto, dobbiamo approfondire la nostra conoscenza della frequenza un po' più di quanto abbiamo fatto nel capitolo 2. La frequenza può esser definita come la rapidità con la quale si verifica un evento. Riferendoci alle suocere, voi potreste preoccuparvi del numero di volte che la vostra viene a farvi visita in un anno. La frequenza di questo evento può essere di quattro volte all'anno. In certi casi, questa potrebbe essere considerata alta frequenza. Un nuotatore può fare centoventi bracciate al minuto, frequenza che è già più alta. E le ali di un calabrone battono a una frequenza di circa duecento cicli al secondo, frequenza più alta ancora.

E per l'elettricità? L'esempio più noto è dato dalla frequenza della corrente alternata. La frequenza della corrente alternata è il numero di volte al secondo che gli elettroni fanno un ciclo completo, spostandosi prima in un senso e poi nell'altro.

Possiamo visualizzare l'effetto di questa alternanza facendo passare la corrente in un amperometro che presenta la corrente stessa su un tubo oscilloscopico. In Figura 4.10, vediamo come appare un ciclo di c.a. sull'oscilloscopio. Man mano che la corrente aumenta nella direzione diretta, il punto luminoso sul tubo indica ciò

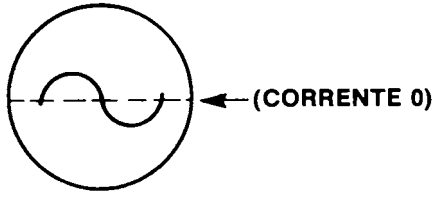


Figura 4.10

spostandosi verso l'alto. Poi la luce si sposta verso il basso man mano che la corrente rallenta, si ferma e accelera nell'altra direzione. Poi la corrente rallenta di nuovo. fino ad arrestarsi. Nella figura, la linea tratteggiata rappresenta la corrente 0. Il picco può rappresentare più 1 ampere e l'avvallamento può rappresentare - 1 ampere - una corrente di direzione opposta.
L'intera figura rappresenta un ciclo di corrente alternata. E ricordate che, poiché la corrente viene comandata dalla tensione, la tensione aumenterà e diminuirà anch'essa con un andamento simile.

Dobbiamo pensare alla frequenza della corrente alternata non come uno spostamento in avanti e all'indietro ma, piuttosto, come un aumento o una diminuzione di corrente. Adesso, possiamo cominciare a vedere che le fluttuazioni di corrente e di tensione si manifestano come delle onde. Queste onde "si propagano" - vale a dire viaggiano per conto loro una volta che siano state fatte partire in un filo - a una velocità vicina alla velocità della luce.

Forse vi è noto che i semiconduttori (ad eccezione del triac) non lavorano con corrente alternata. Essi fanno uso di corrente continua. Quindi vi chiederete perchè ci occupiamo di frequenze e di onde. Ce ne occupiamo perchè si possono avere delle onde in corrente *continua*, come in corrente alternata. Ci occorre comprendere come possiamo avere onde e frequenze senza corrente alternata, perché è delle frequenze di queste onde che ci occupiamo quando parliamo di semiconduttori in "alta frequenza" e in "bassa frequenza".

Riferiamoci di nuovo al sistema dell'altoparlante precedentemente discusso. In risposta alle onde sonore che colpiscono il microfono, il transistore fa sì che la corrente che va dall'alimentazione dell'altoparlante vari - cioé aumenti e diminuisca. La tensione fornita all'altoparlante va anch'essa crescendo o decrescendo. Se facciamo passare questa corrente nell'amperometro e nell'oscilloscopio come abbiamo fatto con la corrente alternata, avremo un'immagine simile ad un'onda, come in Figura 4.11.

La differenza è che, in questo caso, l'avallamento più basso non cade mai al disotto della linea di zero. Cioè, la corrente non inverte mai direzione ma scorre sempre in avanti. Questa è, quindi la natura delle onde in corrente continua.

Ciò a cui siamo realmente interessati è la frequenza di queste onde. Sistemi, o parti di sistemi differenti, lavorano a frequenze differenti. Abbiamo fatto notare ciò nel nostro confronto fra l'addizionatrice digitale e il sistema radar? Certi circuiti e certi semiconduttori funzionano bene entro una data gamma di frequenze ma non si comportano bene a frequenze più alte.

Che cosa impedisce a certi semiconduttori e a certi circuiti di funzionare alle alte frequenze? E' un aspetto del comportamento degli elettroni chiamato "reattanza".

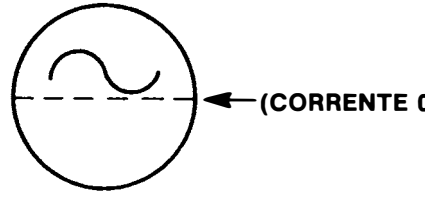


Figura 4.11

COS'E' LA REATTANZA?

Abbiamo già visto come la resistenza ostacoli il flusso di elettricità. La reattanza è l'altro fattore che tende a ostacolarlo.
Ma, mentre la resistenza si fa sempre sentire, la reattanza è presente solo quando la corrente o la tensione viene *aumentata* o *diminuita*. Vale a dire, la reattanza ostacola solamente le *variazioni* di tensione e di corrente. Quante più variazioni abbiamo in tensione e in corrente - quanta più alta è la frequenza - tanto più reattanza abbiamo nel circuito. Questa è la ragione fondamentale per cui il comportamento dei circuiti e dei dispositivi alle alte frequenze è diverso da quello che si ha alle basse frequenze.

Visualizziamo un semplice circuito con un'alimentazione a 12 Volt, un transistore commutatore e una lampadina. Si tratta di una lampadina speciale, che può

essere accesa e spenta, rapidamente, come vogliamo. Supponiamo di aprire e chiudere il commutatore a una frequenza di un milione di volte al secondo. La linea tratteggiata in Figura 4.12 indica cosa vogliamo che faccia la tensione in tutto il

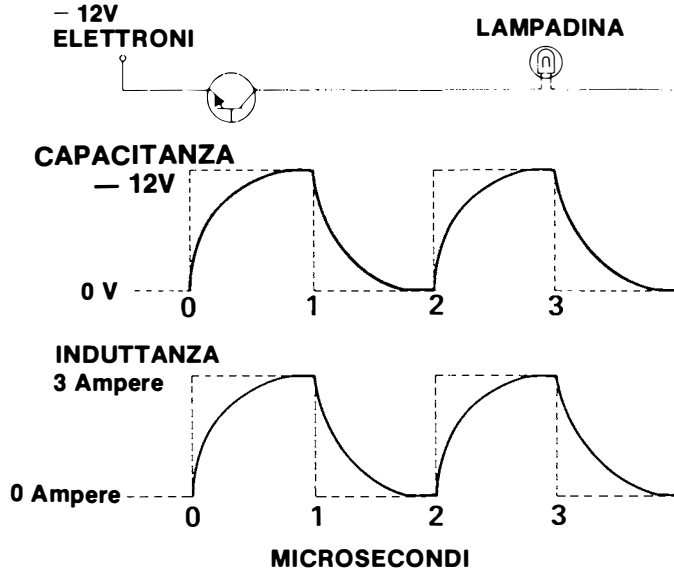


Figura 4.12

filo. L'intera figura formata dalla linea tratteggiata è chiamata "forma d'onda". Essa dice che vogliamo che la tensione salga istantaneamente a 12 Volt quando chiudiamo l'interruttore, per poi cadere istantaneamente a zero Volt quando apriamo l'interruttore. Quando è trascorso un milionesimo di secondo (1 microsecondo) il transistore viene di nuovo portato in conduzione e il ciclo si ripete. Similmente, facciamo in modo che la *corrente* aumenti e cada altrettanto rapidamente.

Purtroppo, queste forme d'onda rettangolari, nette e ripide, di tensione e di corrente, sono delle forme d'onda ideali che non è mai possibile realizzare nella pratica effettiva. Colpevole di questo fatto è la reattanza. La reattanza fa da freno ad ogni variazione di tensione o di corrente, facendo sì che esse crescano lentamente in un periodo di tempo successivo alla chiusura dell'interruttore. Ciò che abbiamo, in pratica, sono le forme d'onda indicate a tratto continuo nella figura. Le forme d'onda della corrente sono molto simili alle forme d'onda della tensione - salita graduale, caduta graduale.

La caratteristica della reattanza che si fa sentire sulla corrente è diversa da quella che si fa sentire sulla tensione, ma l'una e l'altra sono in stretta relazione. La "Capacità" è l'effetto frenante sulle variazioni di *tensione*, l'"Induttanza" è l'effetto sulle variazioni di *corrente*.Ogni parte di un circuito risente di entrambe queste forme di reattanza.

Qual'è la causa della capacità? Bé, ci vuol del tempo per sommare o sottrarre abbastanza elettroni dal filo per variare la tensione, proprio come ci vuole del tempo per aggiungere acqua a un secchio facendo salire il livello dell'acqua che esso contiene o per far uscire aria da una gomma d'automobile facendone abbassare la pressione. E, proprio come un secchio più grosso ha una maggior capacità d'acqua e così richiede più tempo per riempirsi, un conduttore più lungo e di maggior spessore ha una maggior capacità di elettroni e richiede più tempo per riempirsi fino al livello di tensione voluto. Si dice che questo conduttore di grandi dimensioni, che può essere un filo o un dispositivo come un semiconduttore, ha più capacità di un piccolo conduttore.

Qual'è la causa dell'induttanza? Gli elettroni, partendo da uno stato di quiete, richiedono tempo per raggiungere la loro velocità finale nel conduttore, così come richiede tempo la vostra automobile per raggiungere i 100 chilometri all'ora partendo da fermo. Analagomamente, gli elettroni non possono fermarsi improvvisamente, non più di quanto voi possiate frenare la vostra macchina per arrestarla istantaneamente. Gli elettroni sono dotati di inerzia, proprio come la vostra automobile da 4000 chili. Questo è il motivo per cui gli elettroni reagiscono fiaccamente alle variazioni di livello della corrente.

COME SI FA SENTIRE LA REATTANZA ALLE DIVERSE FREQUENZE DI LAVORO?

Adesso che abbiamo un'idea degli effetti frenanti della reattanza capacitiva sulla tensione e della reattanza induttiva sulla corrente, la questione è di vedere come queste proprietà influenzino i circuiti alle alte frequenze. Consideriamo di nuovo il nostro circuito interruttore di una lampadina, rappresentato in Figura 4.13. Supponiamo di azionare la nostra lampadina a una frequenza bassa, diciamo Kilohertz.

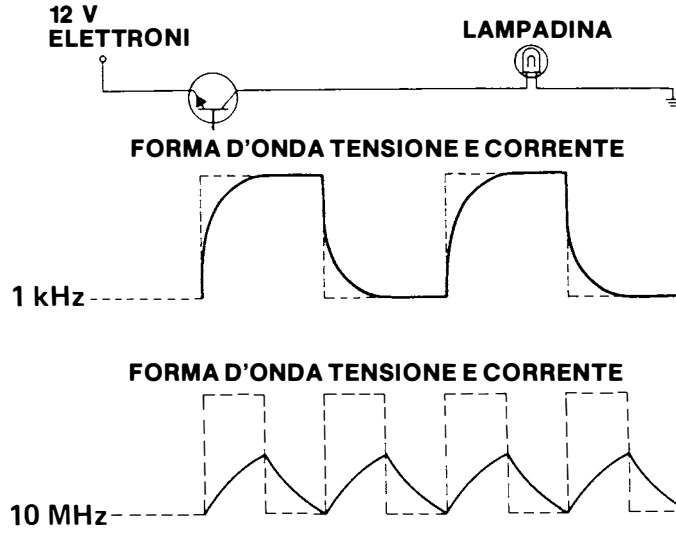


Figura 4.13

A questa bassa frequenza, chiudendo e aprendo l'interruttore 1000 volte al secondo, il ritardo causato dalla reattanza è molto breve nei confronti della lunghezza dell'impulso - per cui otteniamo una forma d'onda che è soddisfacentemente rettangolare. Il nostro circuito ha conseguito il suo scopo, perché la lampadina lampeggia ad intervalli giusti. La capacità e l'induttanza non causano problemi a questa frequenza relativamente bassa.

Ma cosa succede se aumentiamo la frequenza, diciamo a 10 megahertz, 10 milioni di impulsi al secondo? In figura 4.13, la forma d'onda contrassegnata "10 MHz" è, in linea tratteggiata, quella a cui vorremmo che assomigliassero le forme d'onda della nostra tensione e della nostra corrente. Ancora una volta, noi vorremmo degli impulsi rettangolari netti, con inizio e fine istantanei quando il transistore viene commutato in conduzione e all'interdizione.
Ma, a causa della reattanza, otteniamo invece la curva smussata riprodotta in tratto pieno. La tensione e la corrente hanno appena il tempo di cominciare a salire quando il transistore va all'interdizione, che esse sono ributtate giù. Dopodiché, può accadere che, prima ancora che si sia raggiunto lo zero, il transistore vada in conduzione e fornisca nuova potenza, facendo ripartire la curva verso l'alto. Evidentemente, il comportamento del circuito non ha nulla a che vedere con quello da noi richiesto. Così, diremo che questo circuito ha troppa reattanza per funzionare a una frequenza così alta. La lampadina non si accende né si spegne in modo decisivo agli intervalli voluti, ma seguita a tremolare debolmente.

Le cose andrebbero ancora peggio se stessimo pilotando un transistore anzichè una lampadina. Se il vertice della nostra forma d'onda rappresentasse il livello della tensione di soglia necessario per mandare in conduzione un transistore, il nostro circuito ad alta reattanza, lavorando a questa frequenza, non accumulerebbe mai una tensione sufficiente per far commutare il transistore.

Adesso potete vedere a quali conclusioni volevamo giungere. I circuiti che lavorano a delle frequenze elevate, danno adito a molte considerazioni speciali di progetto, relative tanto ai dispositivi che ai circuiti. Un requisito assolutamente fondamentale è che i semiconduttori e gli altri dispositivi siano molto piccoli e interconnessi da fili di piccolo diametro e di lunghezza molto ridotta - perchè quanto minore è il materiale conduttore impiegato, tanto più piccola è la reattanza.

Vi sarete probabilmente già accorti che questi requisiti dell'alta frequenza sono proprio il contrario dei requisiti occorrenti per far fronte nel modo migliore a una potenza elevata, che abbiamo discusso poche pagine indietro. Il riconciliare questi obiettivi contrastanti che contrappongono la frequenza e la potenza e il far sì che essi si compensino l'uno con l'altro rappresenta una continua difficoltà, sia per i progettisti di semiconduttori, che per i progettisti di apparecchiature.

Prima di cambiare argomento, faremo notare che la reattanza non è sempre un male. Come la maggior parte delle caratteristiche elettriche, essa può spesso venire utilizzata vantaggiosamente.
I condensatori e gli induttori sono due componenti molto utili e comuni, che sfruttano proficuamente la reattanza.

Dove sta la linea di separazione fra bassa frequenza e alta frequenza? Questa linea di demarcazione è ancora meno definita di quella fra bassa e alta potenza. Ma grosso modo, le prestazioni di un tipico circuito in bassa frequenza si saranno visibilmente deteriorate a qualcosa come 300 kilohertz - 300.000 cicli al secondo. Un circuito di questo genere sarà probabilmente del tutto inservibile a 3 megahertz - 3 milioni di cicli al secondo.

Dove abbiamo la probabilità di incontrare alte frequenze? Le alte frequenze sono utili sia nelle apparecchiature digitali che in quelle analogiche. Nei calcolatori digitali, le alte frequenze dei circuiti di commutazione - che attualmente raggiungono i 200 megahertz - rendono possibile il funzionamento incredibilmente veloce e la staordinaria capacità di "macinare numeri" dei moderni calcolatori. Le apparecchiature analogiche, che fanno uso di circuiti di tipo amplificatore, impiegano delle frequenze ancora più alte; nelle telecomunicazioni, le onde radio vengono trasmesse e ricevute entro un larghissimo spettro di frequenza - che arriva a centinaia di gigahertz - miliardi di cicli al secondo.

Se avete dimestichezza con le bande di frequenza impiegate in radiodiffusione saprete com'è ampio questo spettro. Le onde radio a bassissima frequenza (VLF) comprese fra i 10 e 30 kilohertz, per esempio, vengono usate per le trasmissioni con i sommergibili in immersione.Le basse frequenze vengono usate , fra l'altro dalle navi di superficie. Le nostre più comuni apparecchiature radio cadono nella categoria delle medie frequenze, usate per la radio diffusione in AM e per impieghi su aerei e su mezzi mobili terrestri. Le alte frequenze vengono usate per la radiodiffusione a grande distanza a onde corte. Le frequenze molto alte (VHF) e ultra alte (UHF) vengono usate per la radiodiffusione in FM e la televisione. Ancora più alte di queste sono le frequenze dette a "microonde", che vengono usate nei ponti radio e nei radar. Al di là di queste frequenze, passiamo ai raggi infrarossi.

Prima di vedere i quesiti relativi a questo capitolo e di andare avanti, forse vorrete prendere un momento di respiro per riesaminare l'"albero genealogico" dei semiconduttori riportato in Figura 4.5, non foss'altro per essere sicuri di avere ben chiari le caratteristiche delle principali categorie.

A questo punto, sappiamo abbastanza sull'uso dei semiconduttori nei circuiti e nei sistemi, per i nostri fini. Nel prossimo capitolo, cominceremo ad esaminare i dispositivi semiconduttori veri e propri, partendo dai più semplici di tutti, ossia dai diodi.
Nelle lezioni successive, passeremo in rassegna i transistori, i thyristori, i dispositivi opto-elettronici, i circuiti integrati ed altri componenti ancora.

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 4

1. Nei gate digitali e nei flip-flop, un livello di tensione più alto, di solito indica
- ☐ a. "1"
- ☐ b. Sì
- ☐ c. "0"
- ☐ d. No
- ☐ e. Come in a e b
- ☐ f. Come in c e d

2. Nei registri a scorrimento costituiti da vari flip-flop, il segnale di clock:
- ☐ a. Ci dice che ora è
- ☐ b. Indica quando trasferire un bit dati dall'entrata del flip-flop all'uscita
- ☐ c. E' un bit d'informazione memorizzato nel flip-flop
- ☐ d. Nulla di tutto ciò

3. Leggendo da *destra a sinistra*, le cifre digitali rappresentano 1, 2, 4, 8, 16, 32, etc. Così il numero decimale "10" si scrive in codice binario:

	valore dei bit: 8 4 2 1
☐ a.	1 0 1 0
☐ b.	0 0 1 0
☐ c.	1 1 1 0
☐ d.	1 1 1 1

- ☐ e. Nulla di tutto ciò

4. La sezione di una semplice addizionatrice digitale che prende delle decisioni importanti ma non memorizza informazioni è:
- ☐ a. La memoria
- ☐ b. L'addizionatore
- ☐ c. La tastiera in entrata
- ☐ d. Il converitore decimale-binario
- ☐ e. Il convertitore binario-decimale
- ☐ f. L'indicatore in uscita

5. La progettazione di semiconduttori che possono portare correnti forti comporta:
- ☐ a. L'aumento delle dimensioni del chip semiconduttore
- ☐ b. Il miglioramento del grado di contatto fra il chip e la custodia
- ☐ c. L'ingrandimento della custodia in modo tale che essa trasferisca più calore all'atmosfera circostante e al telaio.
- ☐ d. Nulla di tutto ciò
- ☐ e. Tutto quanto detto sopra.

6. I semiconduttori considerati di "bassa potenza" o per "piccoli segnali" hanno, di solito, una potenza dissipata nominale di:
- ☐ a. 20 watt o meno
- ☐ b. 10 watt o meno
- ☐ c. 5 watt o meno
- ☐ d. 1 watt o meno

7. La reattanza è una proprietà dei dispositivi elettrici e dei conduttori che:
- ☐ a. Resiste al flusso di elettroni
- ☐ b. Ritarda le variazioni di tensioni
- ☐ c. Ritarda le variazioni di corrente
- ☐ d. Come in a e b
- ☐ e. Come in b e c

8. Alcuni modi per far sì che i semiconduttori abbiano migliori prestazioni alle frequenze più alte sono:
- ☐ a. Diminuire le dimensioni del chip semiconduttore
- ☐ b. Rendere i terminali più corti e più piccoli
- ☐ c. Fare uso di contenitori più piccoli
- ☐ d. Tutto come detto sopra
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

9. Le onde in corrente continua possono comportare:
- ☐ a. Delle variazioni regolari nella direzione del flusso di elettroni
- ☐ b. Delle variazioni regolari nei livelli di tensione
- ☐ c. Delle variazioni regolari nei livelli di corrente
- ☐ d. Una frequenza, come si ha nelle onde in corrente alternata
- ☐ e. Come in a, b e c
- ☐ f. Come in b, c e d

10. Nei confronti dei transistori per piccoli segnali, i transistori di potenza di solito:
- ☐ a. Costano di più
- ☐ b. Sviluppano più calore
- ☐ c. Sono più grossi
- ☐ d. Sono più complessi
- ☐ e. Commutano più lentamente
- ☐ f. Tutto quanto detto sopra
- ☐ g. Tutto tranne d

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 5

Diodo a giunzione P-N Dispositivo semiconduttore che permette agli elettroni di scorrere solo in una direzione.

Rettificazione Il più semplice uso di un diodo: la conversione di una corrente alternata in impulsi di corrente continua.

Condensatore Dispositivo elettrico che viene comunemente usato per livellare degli impulsi irregolari di corrente elettrica, consentendo un flusso di elettroni più costante.

Rivelazione "Demodulazione" di onde elettriche ad alta frequenza provenienti da una antenna radioricevente, per recuperare l'informazione trasmessa (tipicamente il suono). Ciò si può fare semplicemente (per le onde in AM) rettificando la corrente di antenna con un diodo.

Clamping (bloccaggio). Uso di un diodo per impedire che la tensione in un filo superi la tensione in un secondo filo.

Carica elettrica Proprietà degli elettroni e dei protoni per cui "le particelle simili si respingono e le particelle dissimili si attraggono".

Protone Particella carica elettricamente, situata *entro* il nucleo di ogni atomo. La carica del protone è chiamata positiva (+) per indicare che essa è uguale e opposta a quella dell'elettrone.

Elettrone Particella carica elettricamente *orbitante* intorno al nucleo di ogni atomo. La carica dell'elettrone è chiamata negativa (—) per indicare un effetto elettrico uguale e opposto a quello di un protone.

Materiale semiconduttore E' un cristallo (di solito silicio o germanio) che è "talvolta" un conduttore, perchè si può far in modo che porti corrente elettrica per mezzo di elettroni liberi o per mezzo di "lacune" che si spostano fra gli elettroni vincolati.

Materiale semiconduttore di tipo N E' un cristallo semiconduttore contenente una piccola percentuale di atomi di "drogaggio", che hanno un elettrone esterno in più rispetto agli altri atomi.
Questi elettroni negativi supplementari possono non trovare orbite non occupate che li vincoli, per cui essi sono liberi di migrare e costituiscono la corrente elettrica. Un comune elemento di "drogaggio" di tipo N per il silicio è il fosforo.

Materiale semiconduttore di tipo P E' un cristallo semiconduttore contenente una piccola percentuale di atomi di "drogaggio" che hanno un elettrone esterno in meno rispetto agli altri atomi. Ogni atomo di "drogaggio" determina un posto non occupato - una "lacuna" - fra gli elettroni che sono vincolati nelle loro orbite. Le lacune sono cariche positivamente e possono spostarsi costituendo una corrente elettrica. Un comune elemento di "drogaggio" di tipo P per il silicio è il boro.

Giunzione P-N E' la linea di divisione fra una regione P e una regione N, in un semiconduttore. Gli elettroni possono scorrere da N a P ma *non* da P a N.

CAPITOLO 5

I DIODI: COSA FANNO E COME FUNZIONANO

I diodi sono il punto di partenza logico nella nostra discussione sui dispositivi semiconduttori per due ragioni. La prima è che i diodi sono il tipo più semplice di semiconduttore, la seconda è che la comprensione di base dei semiconduttori che otteniamo dallo studio dei diodi è applicabile ad altri tipi di semiconduttori come i transistori, i circuiti integrati e perfino i circuiti integrati su larga scala (LSI). Finora ci siamo quasi esclusivamente occupati di cosa *facciano* i semiconduttori. Abbiamo adottato questo approccio perchè è difficile comprendere i semiconduttori senza sapere che cosa sono destinati a compiere.

QUALI SONO LE PIU' SIGNIFICATIVE CARATTERISTICHE ESTERNE DI UN DIODO?

Il nome "diodo" significa semplicemente "avere due elettrodi". Un diodo è semplicemente un contenitore con due terminali o fili. L'unica caratteristica esterna significativa di un diodo è data dalle sue dimensioni. Il piccolo dispositivo in Figura 5.1 è un diodo.

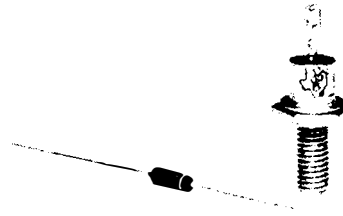


Figura 5.1

Quello più grosso può esservi più noto con il nome di "raddrizzatore" (o rettificatore) ma un "raddrizzatore" non è altro che un diodo maggiorato. Adesso che sapete qualcosa sulla dissipazione di potenza, avete probabilmente concluso che i dispositivi più piccoli portano meno potenza dei grandi, ma, di solito, a una frequenza più elevata. Ricordando che una qualità si deve barattare con l'altra, potrete concludere che i diodi più grandi ("raddrizzatori") con i loro terminali a forte dissipazione del calore, possono portare più potenza, ma a frequenze più basse. Ciò è generalmente esatto.

CHE COSA FA UN DIODO?

La più importante funzione di un diodo è quella di agire come una valvola a senso unico per il passaggio di elettroni. Il diodo permette agli elettroni di scorrere attraverso esso in una direzione, ma sbarra loro il passaggio nell'altra direzione. Perciò, un diodo è essenzialmente un dispositivo di commutazione, piuttosto che un dispositivo di regolazione.

Il simbolo di un diodo è indicato in Figura 5.2. La direzione nella quale possono passare gli elettroni è *opposta* alla direzione indicata dalla freccia. Gli elettroni scorrono entro il diodo dal catodo all'anodo.

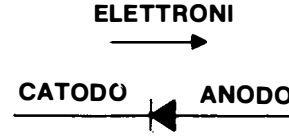


Figura 5.2

Una primaria applicazione dei diodi è quella di convertire la corrente alternata in corrente continua. La Figura 5.3 mostra tale applicazione e fa vedere anche cosa succede alla forma d'onda della corrente. L'alimentazione è un generatore in c.a. che eccita un motore in c.c. La forma d'onda "A" è la normale c.a. che già conoscete gli elettroni partono da una condizione di riposo, accelerano nella direzione diretta, rallentano fino a fermarsi, poi accelerano fino a un massimo nella direzione opposta. Questo va bene se adoperiamo un motore in c.c. Ma i motori sono pignoli e questo motore in c.c. accetta solo un c.c.

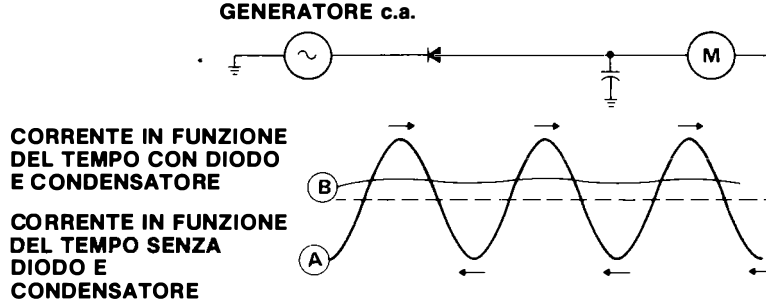


Figura 5.3

Visualizziamo cosa succede quando mettiamo un diodo nel circuito. Esso lascerà passare la metà superiore della forma d'onda, ma non la metà inferiore. E' come se cancellassimo tutto quello che sta al disotto della linea tratteggiata. Tutti gli impulsi di corrente che passano vengono convogliati nella stessa direzione. Questa

funzione del diodo viene chiamata "rettificazione". E' per questo che i diodi costruiti per questo specifico scopo sono chiamati "rettificatori" (o "raddrizzatori").

Disgraziatamente, gli impulsi di corrente che rimangono dopo la rettificazione non danno una sorgente di potenza molto regolare. Così, questo circuito ci dà una possibilità di dimostrare cosa può fare un condensatore in un circuito. Quando mettiamo il condensatore fra il generatore e il motore, si ottiene il risultato di spianare la forma d'onda come indicato in "B". E' un po' come costruire una strada attraverso una serie di colline, livellando le cime e usando la terra tolta per riempire gli avvallamenti. Come fa questo il condensatore? Ricordate, la capacità è l'effetto che ritarda delle subitanee variazioni di tensione. Un condensatore fa ciò agendo come un serbatoio di immagazzinamento degli elettroni. Si immagini una grande vasca piena di acqua, come in Figura 5.4. L'omino scarica ripetutamente dei secchi d'acqua nella

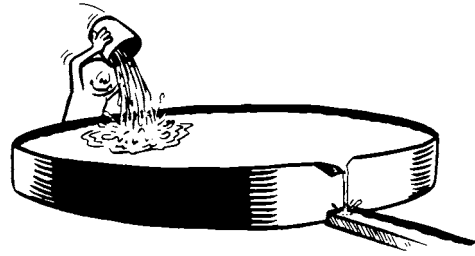


Figura 5.4

vasca. Così l'acqua viene scaricata nella vasca in getti o impulsi. Ma dall'altra parte della vasca, l'acqua defluisce con flusso abbastanza costante e regolare. I condensatori immagazzinano e liberano elettricità in un modo molto simile a questo.

Poichè questo particolare diodo comanda un motore, dev'essere un dispositivo di potenza, molto simile a quello visto nella fotografia. Esso non deve commutare ad alte frequenze - solo a 50 Hz (cicli al secondo), come la corrente domestica che esso porta.

QUAL'E' UNA TIPICA APPLICAZIONE A BASSA POTENZA DI UN DIODO?

Vediamo ora un'applicazione a bassa potenza o per segnali piccoli. La più antica applicazione di un diodo la si può trovare nelle vecchie radio a cristallo del 1920 e del 1930. Il cristallo di solfuro di piombo (galena), in queste radio, funzionava come un diodo a semiconduttore, molto prima che la parola "semiconduttore" entrasse nell'uso. Vediamo che funzione ha.

La Figura 5.5 presenta un sistema radio ricetrasmittente in AM. Sotto ogni stadio del sistema vi è un disegno di come le onde appaiono in quello stadio.

Abbiamo già parlato di queste onde. Ricorderete che, nella radiotrasmissione, si usa, per modulare l'ampiezza delle onde ad alta frequenza prodotte da un oscilla-

tore, un segnale microfonico a bassa frequenza. Il segnale modulato viene prima convertito in onde radio dall'antenna di radiodiffusione e poi riconvertito in onde elettriche dall'antenna ricevente. Il diodo a cristallo, avente una potenza nominale e una frequenza massima ammissibile di valore modesto, taglia una delle parti di que-

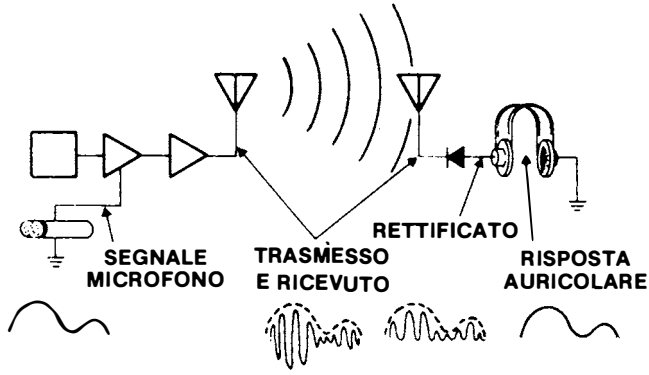


Figura 5.5

ste onde modulate, proprio come faceva il raddrizzatore con il motore nel nostro precedente esempio. Questo segnale raddrizzato eccita gli auricolari di una cuffia. Gli auricolari "fanno la media" degli impulsi a radiofrequenza, in modo molto simile a quanto fatto da un condensatore. Gli auricolari sono incapaci di rispondere ad ogni piccolo impulso delle onde portanti ad alta frequenza, per cui essi fanno la media corrente - e, nel far questo, emettono un suono che è una riproduzione sufficientemente esatta del segnale microfonico.

Si dice che il microfono "modula" il segnale, perchè modifica l'ampiezza delle onde ad alta frequenza emessa dall'oscillatore. Il processo inverso, compiuto dal diodo, viene perciò chiamato "demodulazione" o "rivelazione". Pertanto, un diodo impiegato a questo fine viene chiamato "rivelatore". I moderni diodi semiconduttori fanno la stessa cosa che facevano i vecchi cristalli a galena, ma sono più piccoli, hanno un'affidabilità maggiore, possono portare più potenza e sono meno costosi. Poichè la ricezione delle ordinarie radiodiffusioni in AM e l'eccitazione degli auricolari richiedono solo una modesta potenza nominale e una modesta frequenza massima ammissibile, i diodi usati per questo scopo vengono tipicamente chiamati diodi "general-purpose" (generici).

CHE COS'E' UN DIODO DI "CLAMPING"?

"Clamping" (blocco o fissaggio di un livello) vuol dire che la tensione in un filo supera la tensione in un secondo filo. Vediamo solo un esempio, fra le molte applicazioni di clamping. Nel circuito di Figura 5.6, un clamp a diodo viene usato come una specie di valvola di sicurezza per proteggere il transistore dai danni dovuti ad eventuali sovratensioni. Il transistore viene usato per inserire e disinserire la bobina di un elettromagnete. Questa bobina può far parte di un motore o di un relè;

come tutte le bobine, ha una grande induttanza. Una volta messi in moto, gli elettroni nella bobina non vogliono più fermarsi, anche dopo che il transistore è stato portato all'interdizione. Quando il transistore va all'interdizione, la corrente viene bloccata nel punto "A". E' un po' come chiudere il cancello di un recinto contro una

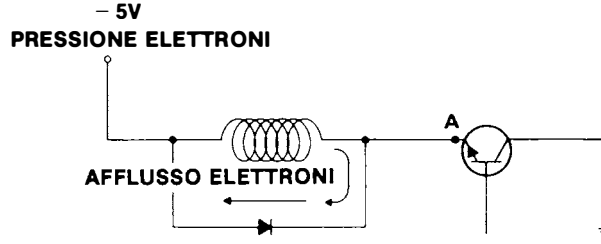


Figura 5.6

mandria di cavalli selvaggi. Gli elettroni seguitano ad arrivare e si ammucchiano, dando luogo a una tensione elevata. Se questa è troppo alta, la corrente potrà irrompere nel transistore a una tensione pericolosamente alta e danneggiarlo o distruggerlo.

La soluzione è semplice. Inseriamo un diodo in parallelo alla bobina come indicato. Il diodo non permetterà agli elettroni provenienti dall'alimentazione di aggirare la bobina ed entrare nel transistore. Ma *permetterà* agli elettroni di scavalcare (bypass) la bobina nell'altra direzione. Così, se la tensione generata dagli elettroni in "A"supera la tensione di alimentazione (5 V), il diodo lascia passare gli elettroni, drenando l'eccesso di elettroni accumulatosi lontano dal transistore. L'emettitore del transistore è perciò bloccato (clamped) a 5 V. La tensione può essere al disotto dei 5 V di pressione elettronica, ma non sarà mai molto al di sopra di tale valore.

Oltre che per raddrizzare, rivelare e fissare un livello, i diodi vengono ancora usati per costruire dei semplici gate logici per i calcolatori digitali. Si usano, per questo scopo, più diodi di quanti non se ne usino per tutti gli altri scopi.

COME VENGONO USATI I DIODI PER COSTRUIRE DEI GATE LOGICI?

La Figura 5.7 rappresenta un gate OR, a due ingressi, a base di diodi. Ricordiamo che l'uscita di un gate OR è "uno" (uno significa una tensione alta) solo se c'è un uno all'ingresso "A" o "B".

Gli elettroni agli ingressi possono muoversi solo in senso *entrante* e non in senso uscente, in conseguenza del fatto che i diodi sono come delle valvole a senso unico. Supponiamo di avere un 1 all'ingresso "B". Gli elettroni fluiranno dalla tensione alta in entrata, producendo una tensione alta (un 1) all'uscita. L'unico modo

per avere uno 0 all'uscita è di avere degli 0 a entrambi gli ingressi. E' una cosa così semplice che viene spontaneo chiedersi "che bisogno abbiamo dei diodi? - perchè non lasciare semplicemente scorrere gli elettroni nei fili?" Per rispondere a questa domanda, consideriamo cosa accadrebbe se avessimo un 1 all'ingresso "A"e uno 0

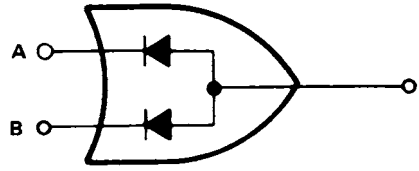


Figura 5.7

a quello "B". Senza il diodo sulla via d'ingresso dello 0 per bloccare la corrente dovuta agli elettroni uscenti, avremo un cammino di corto circuito e gli elettroni uscirebbero attraverso questo percorso, anzichè dall'uscita. La tensione in uscita avrebbe quindi un valore indefinito compreso fra la tensione alta e la tensione bassa. L'uscita non sarebbe un sì o un no deciso ma un "forse". I calcolatori non possono soffrire i "forse", per cui, per costruire questo genere di semplice gate logico *sono necessari* dei diodi.

Siete arrivati a un punto tale di conoscenza da potervi spiegare alcuni fatti, come questo ad esempio: se invertiamo la polarità di un diodo in modo che esso blocchi la corrente impedendole di arrivare all'ingresso, avremo un gate AND. Volete vedere come funziona? Ve lo mostreremo fra un momento.

Un gate a diodi, come qualsiasi altro circuito elettrico, fa uso di potenza ma *non aggiunge* alcuna potenza per compensare le perdite. Così, se collegassimo uno di seguito all'altro migliaia di questi gate, come richiesto in un grande calcolatore, dovremo fornire una potenza enorme all'ingresso del primo gate per ottenere un qualche segnale all'uscita dell'ultimo gate.Ciò non è pratico. Così, i gate a diodi, pur avendo vaste applicazioni nei sistemi digitali, non possono essere impiegati da soli come gate, ma vanno associati con dei circuiti che forniscono potenza.

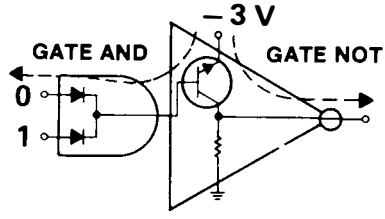


Figura 5.8

Una tipica soluzione di questo problema consiste nell'*elevare* la potenza in uscita del gate a diodi per mezzo di un transistore. La Figura 5.8 chiarisce questa soluzione. In questo cso, vediamo che i diodi compiono una funzione di AND e costituiscono un gate AND. L'uscita di questo gate va ad un amplificatore commuta-

tore a transistori, che aggiunge potenza al segnale, in quanto ha un collegamento di alimentazione e uno di massa. Questo transistore commutatore funziona, inoltre, da invertitore (gate NOT). Una tensione bassa, applicata all'uno o all'altro degli ingressi, richiama degli elettroni dalla base del transistore, mandandoli in conduzione per fornire una tensione alta in uscita.

GATE NAND

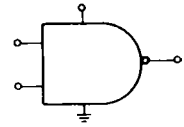


Figura 5.9

Quando mettiamo insieme un gate AND e un gate NOT, essi vengono, di solito, considerati un solo blocco costitutivo, ossia un gate NAND. In Figura 5.9 è riportato il simbolo di un gate NAND. Potete vedere dove ci abbia condotti questo ragionamento. Abbiamo costruito un gate logico, che impiega sia diodi che transistori. Questa logica a diodi e transistori è chiamata "DTL". Questi blocchi costitutivi vengono costruiti sotto forma di circuiti integrati per i moderni calcolatori e raramente fanno ancora uso di dispositivi discreti. Discuteremo più avanti sui circuiti integrati. Per ora, basta che comprendiate la funzione dei diodi nei circuiti logici - è la stessa cosa che i diodi siano contenuti in custodie o costruiti su un chip di silicio insieme con migliaia di altri dispositivi. Le applicazioni dei diodi che abbiamo descritto - rettificazione di potenza, rivelazione, clamping e logica a diodi e transistori - ammontano a circa il 95% di tutti gli impieghi di diodi. E tutte fanno uso della pròprietà del diodo che è quella di funzionare come una valvola a senso unico.

Dopo aver esaminato alcuni usi del diodo e averne capito le funzioni, cerchiamo di illustrare come esso opera. Una volta comprese le proprietà fondamentali del diodo, è facile comprendere tutti gli altri semiconduttori - perchè i principi che stanno alla base del funzionamento del diodo si applicano a tutti i dispositivi a stato solido.

QUALI SONO LE PROPRIETA' DEI MATERIALI SEMICONDUTTORI CHE HANNO IMPORTANZA NELLA COSTRUZIONE DEI DIODI?

Per prima cosa, dobbiamo considerare le proprietà del materiale di base del diodo, ossia di un cristallo di silicio. Parleremo del silicio perchè questo è, di gran lunga, il materiale semiconduttore più usato, ma tenete presente che il germanio e tutti gli altri materiali semiconduttori seguono gli stessi principi generali.

Come tutta la materia, il silicio è costituito da atomi. Al centro dell'atomo di silicio, come indicato in Figura 5.10 vi è una massa concentrata chiamata "nucleo".

Il nucleo contiene quattordici particelle cariche di elettricità chiamate protoni, più alcune particelle neutre che possiamo ignorare. Ruotano intorno a questo nu-

cleo come piccoli satelliti, quattordici altre particelle cariche di elettricità, chiamate "elettroni". Quando diciamo "carica elettrica", vogliamo semplicemente dire che un protone e un elettrone si attraggono l'un l'altro. Due elettroni, per contro, si respingono l'un l'altro. Ancora, due protoni si respingono l'un l'altro. Questa legge fondamentale si esprime così: *Le particelle simili si respingono, le particelle dissimili si attraggono.*

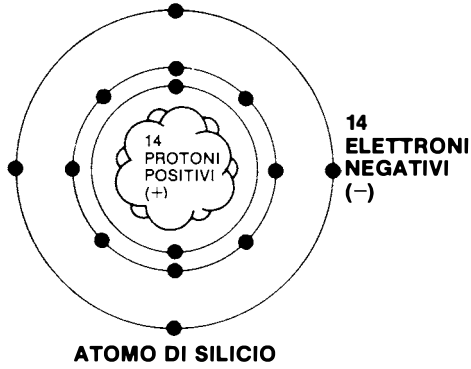


Figura 5.10

Le cariche di un protone e di un elettrone non solo sono contrarie, ma sono anche uguali. Ciò significa che l'insieme di un protone e di un elettrone è elettricamente neutro: cariche uguali e contrarie che si neutralizzano a vicenda. Così questa combinazione non attrae nè respinge alcun'altra particella. Conviene riferirsi alla carica del protone e alla carica dell'elettrone, la carica del protone viene detta "positiva" (+) e la carica dell'elettrone viene detta "negativa" (−), per esprimere il fatto che queste due particelle sono uguali e contrarie quanto a effetti elettrici.

Ricordando la Figura 5.10, vediamo che dieci degli elettroni sono in due strati (o livelli) vicini al nucleo - essi sono in "orbite basse". Così, contando solo il nucleo e i due strati più interni, abbiamo dieci elettroni e quattordici protoni, il che ci dà una carica netta di +4. Nello strato *più esterno,* abbiamo quattro elettroni, che danno a quello strato una carica totale (negativa) di +4. Così, il -4 dello strato più esterno compensa la carica +4 del nocciolo - cioè del nucleo e dei due strati più interni - lasciando l'atomo, nel suo complesso, elettricamente neutro.

Benchè l'atomo del silicio abbia *quattro* elettroni nella sua orbita esterna, esso ha quello che possiamo considerare come un "desiderio" di avere nella sua orbita esterna *otto* elettroni. Questo desiderio è ciò che lega insieme in un cristallo gli atomi di silicio. La Figura 5.11 dà lo schema concettuale di una tipica sezione di cristallo di silicio.
Si noti che la tendenza impellente di ogni atomo di silicio a unirsi con altri atomi è stata soddisfatta grazie all'ingegnosa trovata di condividere ognuno dei suoi elettroni esterni con quattro vicini. Così, l'orbita esterna di ogni atomo, in realtà, si concatena con le orbite esterne dei quattro atomi contigui.

Poichè il numero totale dei protoni è ora uguale al numero totale degli elettroni, il cristallo è elettricamente neutro. Come persone di cui ogni desiderio sia stato soddisfatto, gli atomi se ne stanno nel loro cristallo, buoni e contenti.

Da un punto di vista elettrico, questo silicio puro non ha nessun valore. Esso è un materiale isolante, cioè un cattivissimo conduttore di elettricità - perchè tutti gli

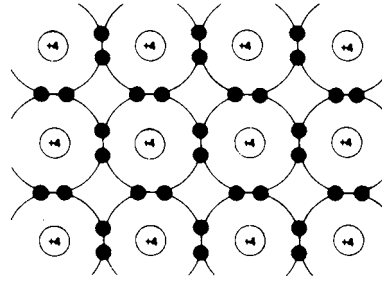


Figura 5.11

elettroni sono strettamente *vincolati* nelle loro orbite condivise. Questi elettroni non possono *scorrere* portando corrente elettrica.

COME SONO FATTI I CRISTALLI DI SILICIO UTILIZZATI PER I SEMICONDUTTORI?

Ciò che ci occorre per il nostro diodo non è il cristallo di silicio puro visto in Figura 5.11. Ci occorre un cristallo con qualche elettrone in più o qualche posto in più dove gli elettroni possono andare. Così, mentre il silicio è ancora allo stato fuso, gli aggiungiamo intenzionalmente certe impurità. Questo processo viene chiamato "drogaggio". Se, per esempio, mescoliamo l'elemento fosforo con il silicio, otteniamo un materiale cristallo del tipo N. Se usiamo del boro, otteniamo un materiale del tipo P. Questi atomi di drogaggio rimpiazzano alcuni degli atomi di silicio nel reticolo cristallino.

Prendiamo per primo il tipo N. Un cristallo drogato con del fosforo ha degli atomi di fosforo sparsi nel suo reticolo. Essi occupano dei posti normalmente occupati da atomi di silicio. Ora, un atomo di fosforo è molto simile a un atomo di silicio, solo che esso ha un protone in più nel suo nocciolo e un quinto elettrone nella sua orbita esterna. Ma dove può andare questo quinto elettrone solitario? Tutti gli strati interni dell'atomo di silicio sono riempiti con la loro quota di otto elettroni condivisi. Tutti gli *altri* atomi di fosforo hanno lo stesso problema di un elettrone in più, per cui, certamente, non ne accetteranno un altro. Tutto ciò che gli elettroni liberi possono fare è di errare fra gli atomi cercando delle orbite non riempite. Non vi rattristate, però, per la loro difficile situazione, perchè, ben presto, troveremo modo di occuppare il loro tempo.

"Drogando" il materiale grezzo di silicio con del fosforo, abbiamo creato un cristallo di silicio capace di condurre l'elettricità. Realizziamo un generatore con un conduttore attaccato ad un estremo del cristallo di tipo N e un altro conduttore uscente dall'altro capo del cristallo stesso. Pompiamo elettroni da una parte del cristallo. Ora, ricordiamo che le particelle simili si respingono l'una con l'altra. così, per ogni elettrone immesso, uno degli elettroni liberi provenienti dagli atomi di fosforo migra all'altro capo dei cristalli ed esce per filo.

Cosa succede quando usiamo un cristallo che è stato drogato con *più* fosforo? Quanto più è il fosforo, tanti più elettroni liberi abbiamo nel cristallo; quanti più elettroni liberi abbiamo, tanti più elettroni entranti possiamo accogliere. Il numero di elettroni *nel cristallo* rimane costante; un elettrone se ne va per ognuno che viene immesso. Moltiplicate ciò che abbiamo visto accadere a un unico elettrone per trilioni di volte e avrete il concetto di come l'elettricità scorra in un semiconduttore del tipo N.

COM'E' FATTO UN CRISTALLO DI SILICIO DI TIPO P?

Per creare dei cristalli di silicio del tipo P, "droghiamo" il materiale fuso con degli atomi di *boro*, per rimpiazzare alcuni degli atomi di silicio nel reticolo del cristallo. Un atomo di boro ha solo tre elettroni nel suo strato esterno. Invece di donare un elettrone libero in più come faceva il fosforo, l'atomo di boro crea una carenza di un elettrone in questa struttura. Chiamiamo questa carenza "lacuna".

Proprio come gli elettroni liberi possono andare errando, così queste lacune possono anch'esse errare attraverso il reticolo, perchè gli elettroni contenuti nello strato esterno degli atomi di silicio trovano molto facile spostarsi e riempire una di queste lacune. Evidentemente, una lacuna non è un'entità fisica come un elettrone, ma, quando un elettrone si sposta da un posto all'altro, è proprio come se la lacuna verso cui esso si è mosso, si fosse spostata nella direzione opposta. Una lacuna rappresenta sempre una carica positiva (+1), dopo aver lasciato l'atomo di boro. Così, la lacuna può esser considerata una carica positiva che si sposta liberamente.

COME CONDUCE ELETTRICITA' IL SILICIO DI TIPO P?

Come abbiamo fatto con il cristallo di silicio del tipo N, supponiamo di collegare un cristallo di silicio del tipo P ad un generatore con dei fili uscenti da ognuno dei due capi del cristallo. Pompiamo fuori un elettrone vincolato. Adesso, abbiamo una nuova lacuna con una carica positiva. Ricordiamo che le cariche simili si respingono. Così la nuova lacuna respinge una vecchia lacuna fino all'altro estremo del cristallo. A questo estremo, un altro elettrone viene dentro e la lacuna viene riempita. Così gli elettroni vincolati si muovono in un senso, per mezzo di lacune che si muovono nell'altro senso.

Come avviene nel caso del tipo N, quando "droghiamo" il silicio più fortemente con atomi di boro, per renderlo del tipo P, accresciamo la sua capacità di portar corrente. Ciò avviene perchè ogni atomo di boro crea una lacuna e, quante più lacune abbiamo, tanti più elettroni esse possono accogliere e tanta più corrente il cristallo può portare. E, ancora una volta, se moltiplichiamo questo processo trilioni di volte possiamo visualizzare come l'elettricità venga condotta dal movimento delle lacune nei semiconduttori del tipo P.

Ricordiamo questo importantissimo fatto: il tipo P conduce elettricità *solo* per mezzo di lacune e *non ha, praticamente, nessun elettrone libero.* Il tipo N conduce solo per mezzo di elettroni liberi; esso *non ha praticamente, nessuna lacuna.*

Vi è probabilmente evidente, ora, che il tipo "N" sta per "negativo", a causa dei suoi elettroni liberi carichi negativamente e che il tipo "P" sta per "positivo", a causa delle sue lacune cariche positivamente.

COME CONDUCONO L'ELETTRICITA' I DIODI?

Adesso che sappiamo come l'elettricità viene condotta nel silicio di tipo N e di tipo P, siamo pronti a vedere come queste proprietà vengono utilizzate nei diodi - per portare elettricità in una direzione e bloccarla nell'altra.

La Figura 5.12 mostra com'è costruito un diodo. Dei terminali sono connessi ai due estremi in un minuscolo chip di silicio trattato in modo da essere del tipo N da

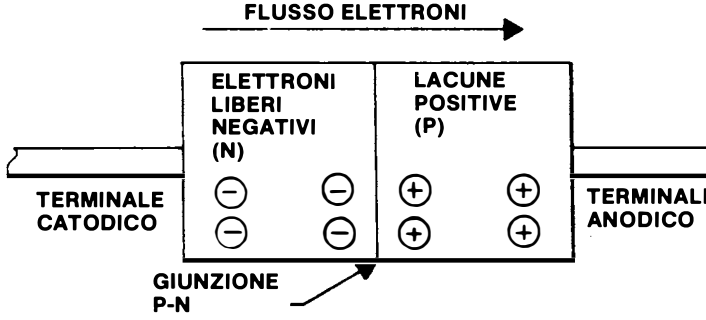


Figura 5.12

un lato e del tipo P dall'altro. In questo esempio, abbiamo quattro elettroni liberi nel materiale N e quattro lacune nel materiale P. La linea di divisione fra i due tipi viene chiamata "giunzione PN". E' il comportamento degli elettroni e delle lacune in vicinanza di questa giunzione che dà ai diodi ed agli altri semiconduttori le loro particolari proprietà.

Supponiamo che, in Figura 5.12, degli elettroni vengano pompati da un generatore nella regione N. Questi elettroni carichi negativamente respingono gli elettroni liberi che si trovano già lì, spingendoli verso la giunzione PN. Nello stesso tempo, degli elettroni vincolati vengono richiamati dalla regione P, creando delle nuove lacune. Le nuove lacune respingono quelle vecchie, facendo spostare le lacune verso la giunzione PN. Così *le lacune* nel silicio tipo P e *gli elettroni liberi* nel silicio tipo N si muovono gli uni verso gli altri. Quando le lacune e gli elettroni liberi s'incontrano alla giunzione, gli elettroni liberi cadono nelle lacune. Questo processo di conduzione continua finché delle nuove lacune e dei nuovi elettroni liberi vengono "pompati dentro".In questo modo, un diodo *coduce* elettricità in una direzione. Vediamo ora come il dispositivo *blocca* la corrente quando essa cerca di andare nell'altra direzione.

COME FANNO I DIODI A BLOCCARE L'ELETTRICITA'?

La Figura 5.13 riproduce la Figura 5.12, con la sola eccezione che gli elettroni stanno tentando di scorrere in direzione opposta, da P a N.

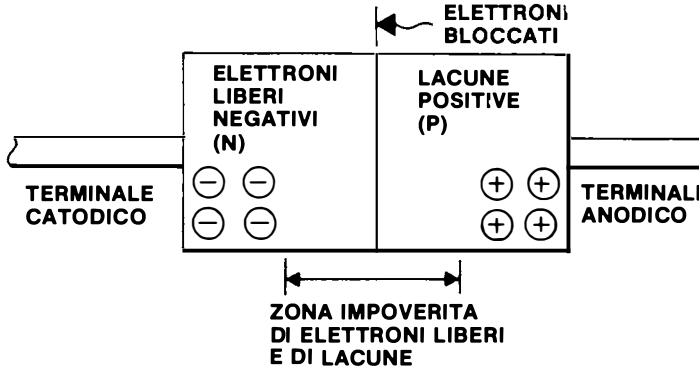


Figura 5.13

Questo è ciò che accade quando un generatore in c.a. entra nella seconda metà del ciclo di corrente alternata. Poichè gli elettroni stanno tentando di scorrere da P a N, gli elettroni liberi nella regione N migrano *via* dalla giunzione PN. Nella regione P, come gli elettroni vincolati si muovono nella direzione del flusso degli elettroni, le lacune si muovono nella direzione opposta, *via* dalla giunzione. Il risultato è che non ci sono elettroni o lacune liberi in nessun posto vicino alla giunzione. In effetti, questa zona è come un cristallo di silicio puro, non "drogato". Essa è effettivamente un isolante, *finchè* gli elettroni non tentano di nuovo di scorrere nella direzione ammessa. Gli elettroni *possono* scorrere da N a P, ma *non* da P a N.

Adesso potete comprendere il significato della parola "semiconduttore". Questo chip di silicio "drogato" è un conduttore elettrico in certe condizioni, ma è un isolante in altre condizioni. Di qui, il termine "semiconduttore".

La comprensione dei diodi è molto importante, essa pone le basi per capire tutti gli altri semiconduttori. Tanto che anche il prossimo capitolo sarà dedicato anai diodi. Esso si occupa delle loro più importanti caratteristiche e dei massimi valori ammessi.

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 5

1. Imparare i principi fondamentali del funzionamento dei diodi è molto utile perché:
- ☐ a. I diodi sono il tipo più semplice di semiconduttore
- ☐ b. Il funzionamento dei diodi è applicabile al funzionamento fondamentale di tutti gli altri tipi di semiconduttori
- ☐ c. I diodi compiono sia la funzione di commutare che quella di amplificare
- ☐ d. Nulla di tutto ciò
- ☐ e. Come in a e b

2. I diodi derivano il loro nome dal fatto che:
- ☐ a. Hanno solo due elettrodi o connessione elettriche
- ☐ b. Possono controllare due diversi circuiti nello stesso tempo
- ☐ c. Sono contemporaneamete dei regolatori e dei commutatori
- ☐ d. Possono funzionare entro due distinte gamme di tensioni
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

3. Di regola, un diodo di potenza e di bassa frequenza rispetto a un diodo a bassa potenza e alta frequenza è:
- ☐ a. Più grande
- ☐ b. Più piccolo
- ☐ c. Più livellato
- ☐ d. Più pesante
- ☐ e. Più pulito

4. Il simbolo di un diodo è:

- ☐ a.
- ☐ b.
- ☐ c.
- ☐ d.
- ☐ e.

5. La funzione fondamentale di un diodo è di:
- ☐ a. Agire come una valvola a senso unico per il flusso di elettroni
- ☐ b. Agire essenzialmente come un dispositivo di tipo commutatore
- ☐ c. Permettere agli elettroni di scorrere in una direzione ma di venir bloccati per non scorrere nella direzione opposta.
- ☐ d. Nulla di tutto ciò
- ☐ e. Come in tutti i punti sopra scritti.

6. La rettificazione di potenza è una funzione di un diodo e in questa situazione esso:
- ☐ a. Converte la corrente alternata in corrente continua
- ☐ b. Converte la corrente continua in corrente alternata
- ☐ c. Può essere accoppiato con un condensatore per fornire una sorgente relativamente livellata di corrente continua
- ☐ d. Nulla di tutto ciò
- ☐ e. Come in a e c.

7. Quando un diodo viene usato in un circuito per impedire che la tensione in un filo superi la tensione in un secondo filo, esso viene usato come un:
- ☐ a. Diodo di clamping
- ☐ b. Parte di un gate logico
- ☐ c. Diodo rivelatore
- ☐ d. Rettificatore
- ☐ e. Come in tutti i punti soprascritti

8. Un diodo usato come rivelatore (demodulatore) in un radioricevitore a cristallo
- ☐ a. Rivela la presenza di elettroni nell'aria
- ☐ b. Rivela dei metalli nel terreno
- ☐ c. Rivela la corrente continua
- ☐ d. Rettifica una corrente alternata ad alta frequenza modulata in ampiezza (AM) proveniente dall'antenna, producendo degli impulsi di corrente continua che danno un valore medio corrispondente a dei segnali sonori in bassa frequenza.
- ☐ e. Rivela eventuali errori di progettazione circuitale

9. Anche se il materiale semiconduttore del tipo N ha alcuni elettroni che si muovono liberamente, oltre a quelli vincolati e il materiale di tipo P ha dei punti vuoti ("lacune") fra i suoi elettroni vincolati, il materiale è pur tuttavia elettricamente neutro, senza eccesso o carenza di elettroni, perchè:
- ☐ a. Ogni atomo costituente il materiale aveva un numero uguale di elettroni negativi e di protoni positivi e nessun elettrone e protone è stato guadagnato o perduto
- ☐ b. Ogni atomo di silicio ha quattro protoni in più che non elettroni e questa disuguaglianza viene compensata dal "drogaggio"
- ☐ c. Tutti gli elettroni liberi nel materiale di tipo N vengono pompati fuori dal circuito elettrico in cui il materiale è usato
- ☐ d. Tutte le lacune del materiale di tipo P vengono colmate da elettroni pompati dentro dal circuito elettrico in cui il materiale è usato
- ☐ e. Gli atomi di fosforo hanno un elettrone in più rispetto al numero di protoni e gli atomi di boro hanno un elettrone in meno rispetto al numero di protoni e uguali quantità di questi elementi di "drogaggio" vengono sempre usate nei materiali di tipo N o in quelli di tipo P

10. Quando degli elettroni vengono pompati attraverso un materiale del tipo P:
- ☐ a. Le lacune di spostano nella direzione opposta
- ☐ b. Gli elettroni vincolati scorrono - non ci sono praticamente degli elettroni liberi nel materiale P
- ☐ c. Un elettrone vincolato può spostarsi solo quando c'è una lacuna prossima ad esso in cui possa andare
- ☐ d. L'effetto risultante è come se qualche specie di particella positiva si stesse spostando nella direzione opposta
- ☐ e. Tutto come sopra

11. Una giunzione PN agisce come una valvola a senso unico per gli elettroni, perchè:

- ☐ a. Quando degli elettroni vengono pompati da N a P, elettroni liberi e lacune vengon costretti a riunirsi insieme, per cui gli elettroni liberi, cadono nelle lacune vicine alla giunzione
- ☐ b. Quando cerchiamo di pompare degli elettroni da P a N, gli elettroni liberi e le lacune vengono costretti ad allontanarsi non lasciando modo agli elettroni di attraversare la giunzione
- ☐ c. C'è un piccolo interruttore meccanico entro ogni diodo
- ☐ d. Il circuito in cui il diodo viene usato cerca solo di pompare gli elettroni in una direzione
- ☐ e. Come in a e b

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 6

Corrente convenzionale E' la definizione convenzionale (o abituale) della direzione della corrente elettrica. Originariamente definita da Beniamino Franklin ma dopo di allora è stato dimostrato che essa è immaginaria. Si immagini che essa scorra da una tensione più positiva a una tensione più negativa - da una tensione più alta a una tensione più bassa. In realtà, nulla scorre in questa direzione. Invece, gli elettroni scorrono da una tensione più negativa a una tensione più positiva - da una tensione più bassa a una tensione più alta (qui tensione significa una tensione "convenzionale", che è la pressione di una correne convenzionale).

Tensione diretta (V_F) In un diodo, è la quantità di cui la tensione anodica è maggiore (e più positiva) della tensione catodica. (la tensione si riferisce alla tensione convenzionale o positiva - la pressione immaginaria della carica positiva).

Tensione inversa (V_R) In un diodo è la quantità di cui la tensione catodica è maggiore (è più positiva) della tensione anodica.

Corrente diretta (I_F) E' la quantità di corrente convenzionale che scorre dall'*anodo al catodo* quando al diodo viene imposta una data tensione *diretta.*

Corrente inversa (I_R) E' la quantità di corrente convenzionale che scorre dal *catodo all'anodo* quando al diodo viene imposta una data tensione *inversa.*

Tensione inversa di breakdown (rottura) (V_{BR}) E' la tensione inversa oltre la quale un diodo non può sostenere una corrente inversa.

Tempo di recupero inverso (t_{rr}) e' il tempo che un diodo richiede per il ripristino dalla conduzione diretta e per iniziare a bloccare la corrente inversa.

CAPITOLO 6

PRESTAZIONI E CARATTERISTICHE DEI DIODI

Prima di riprendere la nostra trattazione sui diodi, dobbiamo fare una digressione ritornando all'elettricità di base per acquisire un concetto che presto sarà importante per noi.

PERCHE' LE FRECCE NEI SIMBOLI DEI SEMICONDUTTORI SONO DIRETTE IN SENSO OPPOSTO AL FLUSSO DEGLI ELETTRONI?

In Figura 6.1 sono indicati i simboli di un diodo e di un transistore NPN, che abbiamo già visto precedentemente.

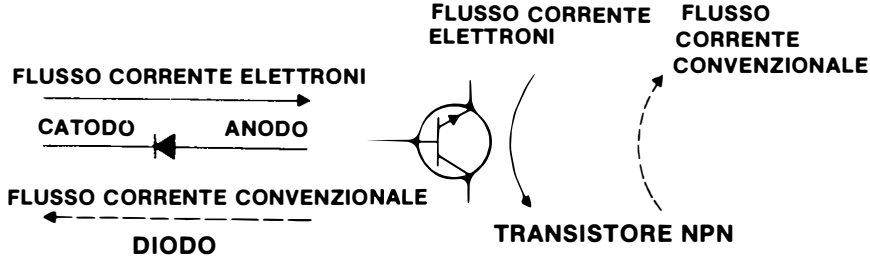


Figura 6.1

Il diodo permette agli elettroni di scorrere in una direzione opposta a quella indicata dalla freccia; gli elettroni scorrono dal catodo all'anodo. Analogamente, il transistore permette agli elettroni di scorrere dall'emettitore al collettore, quando dalla base vengono richiamati degli elettroni, ma la freccia è diretta in senso opposto.

La freccia, tuttavia, è diretta in una direzione significativa. Essa indica la direzione convenzionale del flusso di corrente.

COS'E' LA CORRENTE CONVENZIONALE?

Beniamino Franklin era uno scienziato pieno di immaginazione, ma, una volta, fece una congettura sbagliata e inventò la "corrente convenzionale". Ai suoi tempi, sull'elettricità si conosceva poco più del fatto che dell'ambra e del vetro strofinati si attraevano l'un l'altro grazie ad alcune misteriose forze fisiche. Per contro, due pezzi di vetro, strofinati, si respingevano l'un l'altro e due pezzi di ambra, strofinati, si respingevano l'un l'altro (cariche dissimili si attragono, cariche simili si respingono).

La spiegazione che Franklin diede al fenomeno era soddisfacente per quei tempi. Egli affermò che tutti i corpi, compresi il vetro e l'ambra, contengono un misterioso fluido invisibile. Questo fluido divenne noto come elettricità.

Si sosteneva la teoria che l'ambra e il vetro possiedono ciascuno un quantitativo naturale di questo fluido, che rimane costante in condizioni ordinarie. Ma strofindando l'ambra e il vetro si toglie del fluido da una sostanza e si somministra del fluido all'altra sostanza.
L'attrazione dei corpi dissimili fu spiegata come la tendenza del fluido a ritornare al suo livello normale in ogni corpo. Il fluido in eccesso venne chiamato carica positi-

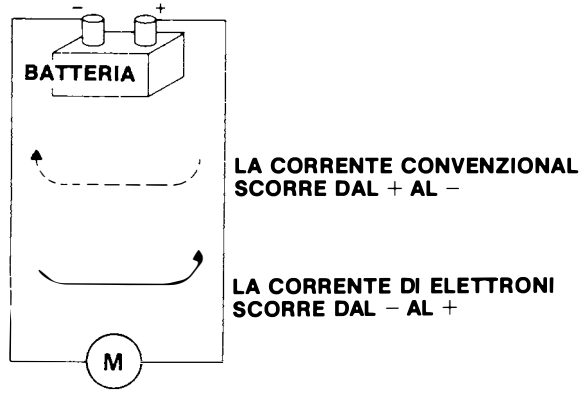


Figura 6.2

va. La teoria di Franklin diceva che il fluido elettrico tendeva a scorrere attraverso un filo da una regione di carica positiva a una regione di carica negativa. Ma egli non sapeva *quale* di questi due corpi - l'ambra o il vetro - possedeva questo accesso di fluido e quale ne aveva carenza.

Così egli fece una congettura intuitiva. Egli suppose che il vetro possedesse l'eccesso in questione e fosse pertanto il corpo caricato positivamente e chiamò negativa la carica dell'ambra.
La sua ipotesi divenne una legge ammessa per *convenzione* in tutti i campi della teoria dell'elettricità, della matematica, dei libri di testo e delle apparecchiature elettriche per i successivi cento anni. In Figura 6.2 si vede come una batteria si supponga che pompi il fluido elettrico teorico di Franklin da quello che finì con l'esser chiamato il suo terminale negativo. I volt divennero la misura della concentrazione e della pressione di questo fluido teorico. In Figura 6.3 si vede come, secondo la teoria convenzionale di Franklin, un conduttore può avere qualsiasi tensione compresa fra delle basse tensioni negative (carenza di fluido) e delle alte tensioni positive (eccesso di fluido).

Franklin aveva ragione nel dire che l'elettricità è una specie di fluido, ma aveva torto nella sua ipotesi sul senso in cui scorre. Doveva passare ancora un secolo prima che qualcuno stabilisse ciò. Quando questo avvenne; gli scienziati scoprirono che il fluido, in realtà, scorre da quello che era stato convenzionalmente chiamato "negativo" al positivo "convenzionale".
Dalle Figure 6.2 e 6.3 appare come il flusso di *elettroni* sia realmente in senso opposto a quello della corrente di Franklin.

Per far andar d'accordo gli elettroni con la teoria di Franklin, che nel frattempo era stata accettata in tutto il mondo, si dovettero chiamare negativi gli elettroni. Così tutti i motori e gli apparecchi elettrici, i libri di testo e quelli di matematica rappresentanti l'elettricità che scorre dal *positivo* al *negativo*.indicavano, in realtà, il flusso di un fluido *immaginario*.
Questo flusso immaginario è quello che noi chiamiamo corrente "convenzionale".

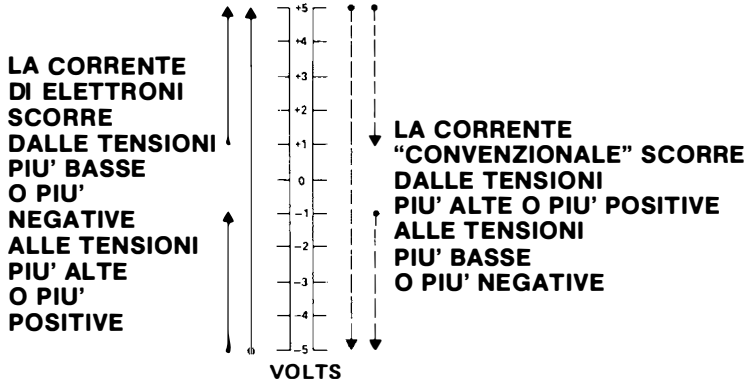


Figura 6.3

Si fa presto a dire che gli scienziati avrebbero dovuto semplicemente ridefinire l'assegnazione del positivo e del nagativo fatta da Franklin rendendo gli elettroni positivi. Ma, a quei tempi, ciò sarebbe stato altrettanto costoso e fonte di confusione quanto il passare dal sistema inglese a quello metrico decimale negli Stati Uniti oggigiorno. Per di più, l'idea di una specie immaginaria di elettricità che scorre dal positivo al negativo è perfettamente soddisfacente. La corrente positiva in una direzione è esattamente equivalente alla corrente negativa nell'altra direzione. Un buon esempio è dato dalla nostra precedente discussione sulle lacune in un materiale semiconduttore. Le lacune hanno lo stesso effetto che avrebbero delle cariche positive che si spostassero in un senso - ma, in realtà, nulla di positivo si muove. Infatti, nulla di *fisico* si sposta in quella direzione; tutto quello che si sposta è la posizione delle lacune al muoversi degli elettroni nella direzione oppposta.

Ancora oggi, la maggior parte degli ingegneri ragiona e parla servendosi della corrente convenzionale di Franklin. Generalmente, quando un ingegnere menziona la corrente o la tensione, egli intende la corrente o la tensione *convenzionale*. Quando si riferisce a una corrente di *elettroni* normalmente specifica che si tratta di una corrente di elettroni. Quando parla di *tensione* di elettroni, di solito si riferisce ad essa chiamandola tensione *negativa*.

Non volevamo confondervi le idee con tutto questo, ma se ci pensate bene, potrete chiedervi alcuni punti. Ripensate alla nostra spiegazione del transistore NPN. Un ingegnere elettronico dirà che la corrente scorre *entrando* nella base del transistore - quando noi sappiamo invece che gli *elettroni* vengono *richiamati* dalla base. Egli dirà ancora che, quando il transistore NPN va in conduzione, la corrente scorre dal collettore all'emettitore, quando invece sappiamo che gli elettroni, in effetti, si spostano nella direzione *opposta*.

In questo capitolo e nel discutere le applicazioni di altri dispositivi nei circuiti, adopereremo i termini relativi alla corrente convenzionale. Ma nei casi in cui spiegheremo il funzionamento *interno* dei semiconduttori, come abbiamo fatto con il diodo nel capitolo precedente, ci serviremo della corrente *elettronica*. In ogni caso, però, faremo in modo che vi rendiate conto del nostro passaggio da una terminologia all'altra.

Dopo questa digressione, siamo pronti per ritornare alla nostra discussione sui diodi ed a discutere il comportamento del diodo.

COSA S'INTENDE PER COMPORTAMENTO DEL DIODO?

Un diodo lascia passare la corrente nella direzione diretta e blocca la corrente nella direzione inversa, come si vede in Figura 6.4.

Si noti che la direzione, adesso, è quella di una corrente convenzionale. Il comportamento del diodo è dato dalla relazione fra la tensione (V) e la corrente (I). Si definisce tensione diretta (V_F) la quantità di cui la tensione anodica supera la tensione catodica (ricordate che stiamo parlando di tensione positiva - cioé della pressione del fluido immaginario di Franklin). In figura 6.4 la tensione diretta è 1 V, giacché la tensione anodica (+6) supera la tensione catodica (+5) di 1 V. La corrente diretta (I_F) è, semplicemente, la quantità di corrente a una data tensione diretta.

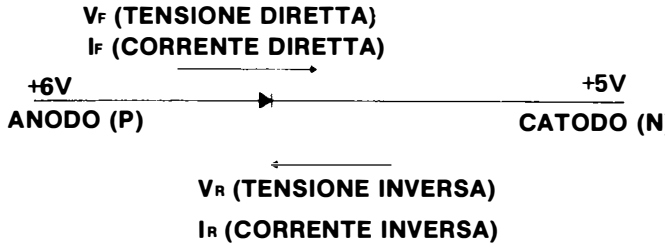


Figura 6.4

Poiché nessun diodo è perfetto, la corrente non è sempre completamente bloccata nella direzione inversa. Quando si applica una tensione inversa (V_R), scorre una piccola quantità di corrente inversa (I_R). La tensione inversa è la quantità di cui la tensione *catodica* supera la tensione *anodica*. E la corrente inversa è la quantità di corrente a una data tensione inversa.

COME SI PUO' INDICARE GRAFICAMENTE IL COMPORTAMENTO DI UN DIODO?

La curva di Figura 6.5 ci dà la chiave per comprendere le specifiche del diodo. Quasi tutte le più importanti caratteristiche del diodo possono venir dedotte da

questa curva, che dà il comportamento di un diodo tipico.

Sulle ordinate sono riportate le correnti dirette (I_F) verso l'alto, e le correnti inverse (I_R) verso il basso. Sulle ascisse sono riportate le tensioni dirette (V_F) verso destra, e le tensioni inverse (V_R) verso sinistra. Si noti che la scala cambia considerevolmente fra la parte delle tensioni dirette e quello delle tensioni inverse; un Volt di V_F, in questo particolare grafico, è uguale in distanza lungo l'asse a —50 V in V_R.

Gli assi dividono l'area in quattro quadranti. Il quadrante superiore destro indica il comportamento del diodo nelle condizioni di tensione e *diretta.* Ad una tensione diretta zero, la corrente diretta è zero. Man mano che la tensione diretta cresce, la corrente cresce, dapprima molto gradualmente e poi più rapidamente. Questa curva ha un "ginocchio" piuttosto pronunciato in prossimità di una certa tensione (0,6 V nei diodi al silicio). A questa tensione diretta, la *corrente* comincia a crescere in modo vistoso e la curva piega verso l'alto. Questo punto può essere considerato come la tensione di soglia, alla quale il diodo comincia realmente ad andare in conduzione (nei diodi al germanio, questo punto è a circa 0,3 V).

Da questo punto in poi, dei leggeri aumenti di tensione determinano degli aumenti di corrente sempre più grandi. Il ramo verso l'alto della curva finisce bruscamente a un limite al quale il diodo brucia per effetto della potenza dissipata - cioé del calore generato nel diodo. Ricordiamo che la potenza dissipata (misurata in watt) è uguale alla corrente (in ampere), moltiplicata per la caduta di tensione in volt). Così, man mano che la corrente e la tensione crescono, si genera un calore

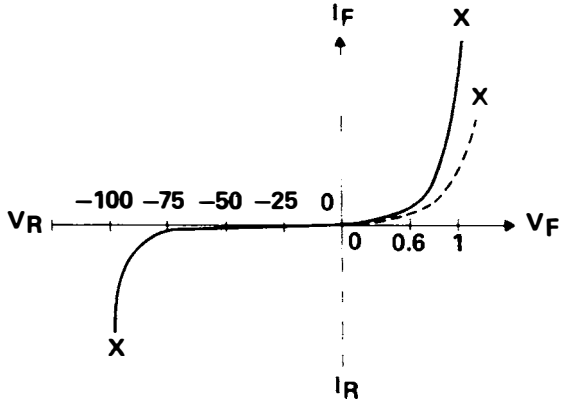


Figura 6.5

sempre maggiore, finché, a un dato punto, il diodo si brucia. La potenza dissipata si indica in modo abbreviato con "P".

Ogni diodo ha una curva di conduzione diretta che ha un aspetto molto simile a quello della curva di Figura 6.5. Vi sono tuttavia delle leggere differenze nella curva e nel punto di bruciatura, che distinguono un tipo di diodo dall'altro. Per esempio, un altro diodo può avere un diagramma di comportamento rappresentato dalla curva tratteggiata. Questa curva indica che il diodo conduce meno corrente per una data caduta di tensione diretta e che può portare meno potenza.

Nel quadrante inferiore sinistro si ha la curva che indica il comportamento del diodo, in condizioni di tensione *inversa*. Al crescere della tensione inversa, l'aumento nella corrente inversa risultante è quello indicato. Ricordiamo che nessun diodo è abbastanza perfetto da bloccare *tutta* la corrente inversa. Una piccolissima quantità di corrente "passa per dispersione" al crescere della tensione inversa.

Anche se non è perfetto, il diodo ha un buon rendimento come valvola a senso unico. Nel nostro esempio tipico, in condizioni di conduzione diretta, meno di 1 Volt produce una corrente molto grande. Ma in condizioni di tensione inversa, qualsiasi tensione al di sotto di —75 V produce solo una quantità di corrente trascurabile.

In condizioni di tensione inversa, si raggiunge finalmente un punto, in corrispondenza del quale ha inizio il crollo completo della capacità di blocco. Oltre questo punto, chiamato $V_{(BR)}$, per "reverse breakdown voltage" (tensione inversa di rottura), il diodo non riesce più a trattenere la corrente inversa. A questo punto, la corrente cresce vistosamente e il diodo ben presto si brucia. Ciò avviene rapidamente perchè, a queste tensioni relativamente elevate, basta una piccolissima corrente per generare un'alta potenza di calore distruttivo.

QUALI SONO LE SPECIFICHE PIU' IMPORTANTI DI UN DIODO?

Consideriamo quali sono alcune delle più importanti specifiche di un diodo. Benché ci sia più di una dozzina di modi per prescrivere le caratteristiche di un diodo, solo cinque di esse sono realmente importanti:

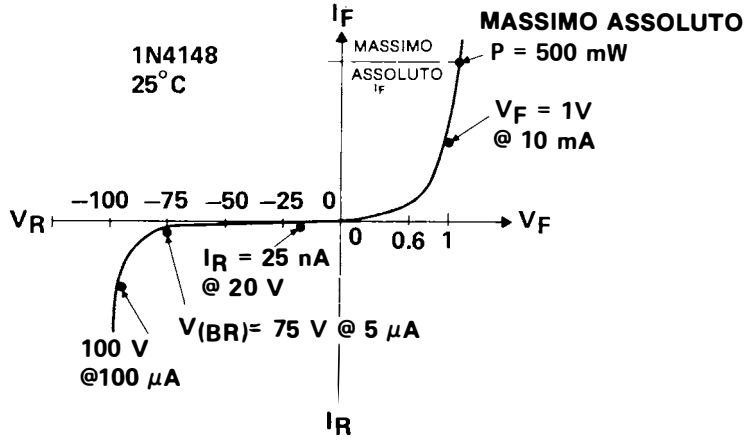


Figura 6.6

I_F *(Corrente diretta:* è la quantità di corrente che il diodo può portare senza bruciare; essa è la misura di quanta potenza il dispositivo può dissipare.

V_F (Tensione diretta): è il livello di tensione necessario a produrre il livello di corrente diretta voluto.

I_R *(Corrente inversa)*: è la quantità di corrente che passa per dispersione attraverso il diodo a varie tensioni inverse.

$V_{(BR)}$ *(Tensione inversa di breakdown)*: è la tensione inversa, oltre la quale la corrente comincia a salire molto rapidamente.

t_{rr} *(Tempo di ricupero inverso)*: è il tempo necessario prima che il diodo si riprenda dalla conduzione diretta e cominci a bloccare la corrente inversa. Questo tempo diventa importante quando consideriamo la frequenza; quanto più alta è la frequenza della corrente alternata applicata al diodo, tanto più rapidamente il diodo deve rispondere per rettificare questa corrente.

Tutte queste specifiche (ad eccezione di t_{rr}) si possono leggere direttamente da una curva I-V, ossia da una curva corrente-tensione, come quella che abbiamo appena visto. Dalla Figura 6.6, appare dove ognuno di questi punti è situato su una curva tipica.

E' importante notare che queste curve sono state ricavate provando i dispositivi in certe condizioni di *temperatura* fisse, perchè la curva varia al variare della temperatura. Tipicamente il dispositivo è circondato da aria a 25°C, essendo questa la normale temperatura ambiente. Se, per esempio, la temperatura dell'aria fosse invece di 100° C, avremmo una corrente considerevolmente maggiore, per una data caduta di tensione. La maggior temperatura determinerebbe un aumento, sia della corrente diretta che della corrente inversa in dispersione.

COME VENGONO INDICATE QUESTE CARATTERISTICHE NEI "DATA SHEET"?

Adesso siamo pronti ad affrontare l'argomento dei "data sheet". I data sheet sono, in realtà, molto più semplici di quanto sembrino. Le Figure 6.7 e 6.8 riportano il frontespizio e il retro di un completo data sheet. Tutti i costruttori di diodi presentano i dati pressapoco nello stesso modo - a noi è capitato di scegliere un data sheet della Texas Instruments perchè ne avevamo uno sottomano.

Gran parte di un normale data sheet non richiede spiegazioni. Il frontespizio indica che questo foglio abbraccia un'intera famiglia di diodi commutatori al silicio planari: l'1N4148, la cui curva abbiamo riportato, più cinque altri diodi molto simili. Sotto di esso è presentato un sommario delle più importanti caratteristiche dei diodi. Sotto, ancora, vi sono i dati meccanici, una descrizione della struttura del diodo e un disegno costruttivo della custodia.

In seguito, viene un elenco dei *massimi valori nominali assoluti. Queste condizioni non possono venir superate senza danneggiare i diodi. Questi massimi valori nominali valgono per tutti i tipi di diodi indicati in questo data sheet.*

Verso il fondo della pagina viene presentata una tabella delle *caratteristiche elettriche.* Si noti che, per ogni caratteristica, sono specificate le condizioni di temperatura e quelle di prova. Questa tabella mette in evidenza le differenze esistenti fra i sei tipi di diodi, con una colonna per ogni tipo. Torneremo a questa tabella fra breve.

La pagina posteriore del data sheet (Figura 6.8) riporta una tabella delle *caratteristiche di commutazione,* che fornisce maggiori dettagli sulle prestazioni di ogni tipo, funzionante entro i massimi valori assoluti.

Il resto della pagina posteriore è dedicato alle *informazioni sulla misura dei parametri* e fornisce una completa descrizione di come, esattamente, sono state fatte le prove su ogni diodo - cosicchè il compratore può verificare le prescrizioni per conto suo.

COME POSSIAMO METTERE IN RELAZIONE QUESTE PRESCRIZIONI DEL DATA SHEET CON LA CURVA I-V?

Nel leggere il data sheet, ci riferiremo ancora alla Figura 6.6; si vedrà allora da quali parti della curva sono stati presi i dati.

La dissipazione di potenza (P) la si può trovare nella tabella dei *massimi valori nominali assoluti.* La massima potenza dissipata deve essere di 500 mW (milliwatt). Questo valore è indicato presso la parte superiore della curva di Figura 6.6. A volte, questo limite viene invece specificato sotto forma di *corrente diretta massima assoluta.*

La *tensione diretta* (V_F) la si trova nella tabella delle *caratteristiche elettriche.* Essa fa vedere che la tensione diretta statica per l'1N4148 è stata provata con una corrente diretta di 10 mA (milliampere). Ad una corrente diretta di 10 mA, l'1N4148 ha una tensione diretta che non supera 1 V. Questa specifica è anche riportata sulla curva e, in sostanza, dice che la TI garantisce che la curva di ogni 1N4148 passerà a sinistra di questo punto.

La *corrente inversa* (I_R) la si trova anch'essa nella tabella delle *caratteristiche elettriche.* Due sono le condizioni di prova: la prima è che a una tensione inversa di 20 V e a una temperatura dell'aria di 25° C c'è una corrente inversa non superiore ai 25 nA (nanoampere o miliardesimi di ampere). Questo appare anche come punto della curva. In effetti, ciò garantisce che la curva di ogni 1N4148 passerà al disopra di questo punto. La seconda condizione di prova per l'I_R è a 20 V e 150° C. Qui vediamo come la corrente inversa di dispersione aumenti con la temperatura - a 150° C la massima dispersione aumenta fino a 50 μA (microampere o milionesimi di ampere). Non troverete questo punto sulla curva, naturalmente, poichè la curva è relativa solo alle condizioni di prova a 25° C.

La tensione inversa di breakdown ($V_{(BR)}$) è nella stessa tabella e vengono specificati due diversi punti limite. Primo, con una corrente inversa di breakdown di 5 μA; la tensione inversa non sarà minore di 75 V. Secondo, le specifiche dicono che quando la corrente di breakdown raggiunge i 100 μA, la tensione inversa non sarà minore di 100 V.

Il tempo di recupero inverso (t_{rr}) lo si trova nella tabella delle *caratteristiche di commutazione.* Diciamo, per inciso, che le condizioni di prova riportate sono delle condizioni d'impiego del tutto tipiche. Si vede che t_{rr} è di 4 ns (nanosecondi o miliardesimi di secondo). Questo è il tempo che passa dopo che la conduzione diretta si è arrestata, prima che il diodo possa cominciare a bloccare la corrente inversa.

Muniti di queste cinque importanti specifiche, siete ora in una buona posizione per interpretare in modo intelligente le informazioni contenute nei data sheet dei diodi - infatti ne sapete abbastanza sui diodi per sceglierli, in caso di impiego, in circuiti semplici. Più importante ancora, la vostra conoscenza dei diodi vi fornisce delle eccellenti basi per lo studio dei transistori, che cominceremo nel prossimo capitolo.

UNI/G

TYPES 1N4148, 1N4149, 1N4446, 1N4447, 1N4448, 1N4449
PLANAR SILICON SWITCHING DIODES

- **Small-Size, Whiskerless, Double-Plug Construction**
- **Extremely Stable and Reliable High-Speed Diodes**

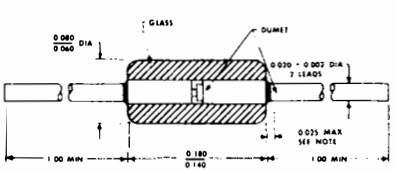
Electrical Equivalents

1N4148 • 1N914
1N4149 • 1N916
1N4446 • 1N914A
1N4447 • 1N916A
1N4448 • 1N914B
1N4449 • 1N916B

mechanical data

The glass-passivated silicon wafer is encased in a hermetically sealed glass package. High-temperature bond between wafer and leads insures integral positive contact under extreme environmental conditions.

*CASE OUTLINE



DIMENSIONS ARE IN INCHES
NOTE WITHIN THIS ZONE DIAMETER OF EACH LEAD IS UNCONTROLLED

CATHODE END IS DENOTED BY COLOR BAND

1

***absolute maximum ratings at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)**

$V_{RM(wkg)}$	Working Peak Reverse Voltage	75 V
P	Continuous Power Dissipation at (or below) 25°C Free-Air Temperature (See Note 1)	500 mW
T_{stg}	Storage Temperature Range	−65°C to 200°C
T_L	Lead Temperature 1/16 Inch from Case for 10 Seconds	300°C

***electrical characteristics at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	1N4148		1N4149		1N4446		1N4447		1N4448		1N4449		UNIT
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
$V_{(BR)}$ Reverse Breakdown Voltage	$I_R = 5\ \mu A$	75		75		75		75		75		75		V
	$I_R = 100\ \mu A$	100		100		100		100		100		100		V
I_R Static Reverse Current	$V_R = 20$ V		25		25		25		25		25		25	nA
	$V_R = 20$ V, $T_A = 100°C$										3		3	μA
	$V_R = 20$ V, $T_A = 150°C$		50		50		50		50		50		50	μA
V_F Static Forward Voltage	$I_F = 5$ mA									0.62	0.72	0.63	0.73	V
	$I_F = 10$ mA		1		1									V
	$I_F = 20$ mA						1		1					V
	$I_F = 30$ mA												1	V
	$I_F = 100$ mA										1			V
C_T Total Capacitance	$V_R = 0$, f = 1 MHz		4		2		4		2		4		2	pF

NOTE 1: Derate linearly to 200°C at the rate of 2.85 mW/deg.

†Trademark of Texas Instruments

* Indicates JEDEC registered data

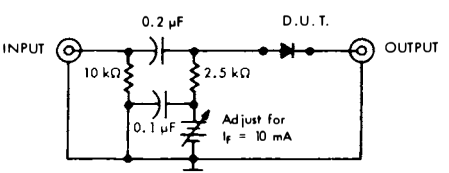
Figura 6-7

TYPES 1N4148, 1N4149, 1N4446, 1N4447, 1N4448, 1N4449
PLANAR SILICON SWITCHING DIODES

*switching characteristics at 25°C free-air temperature

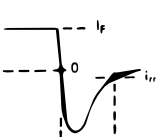
PARAMETER		TEST CONDITIONS	1N4148		1N4149		1N4446		1N4447		1N4448		1N4449		UNIT
			MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
t_{rr}	Reverse Recovery Time	I_F = 10 mA, V_R = 6 V, i_{rr} = 1 mA, R_L = 100 Ω, See Figure 1		4		4		4		4		4		4	ns
$V_{FM(rec)}$	Forward Recovery Voltage	I_F = 50 mA, R_L = 50 Ω, See Figure 2										2.5		2.5	V

*PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION



TEST CIRCUIT

Adjust amplitude
for V_R = 6 V



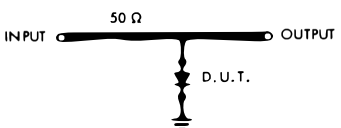
INPUT VOLTAGE WAVEFORM

OUTPUT CURRENT WAVEFORM

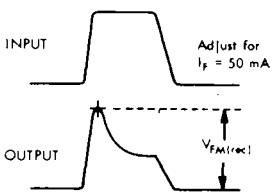
. FIGURE 1 — REVERSE RECOVERY TIME

NOTES a. The input pulse is supplied by a generator with the following characteristics: Z_{out} 50 Ω, $t_r \leq 0.5$ ns, t_p = 100 ns

b. The output waveform is monitored on an oscilloscope with the following characteristics: $t_r \leq 0.6$ ns, Z_{in} = 50 Ω



TEST CIRCUIT



VOLTAGE WAVEFORMS

FIGURE 2 — FORWARD RECOVERY VOLTAGE

NOTES: c. The input pulse is supplied by a generator with the following characteristics: Z_{out} = 50 Ω, $t_r \leq 30$ ns, t_p = 100 ns, PRR = 5 to 100 kHz.

d. The output waveform is monitored on an oscilloscope with the following characteristics: $t_r \leq 15$ ns, $R_{in} \geq 1$ MΩ, $C_{in} \leq 5$ pF.

*Indicates JEDEC registered data

TEXAS INSTRUMENTS
INCORPORATED
SEMICONDUCTOR-COMPONENTS DIVISION
POST OFFICE BOX 5012 • DALLAS, TEXAS 75222

7836

PRINTED IN U.S.A.

TI cannot assume any responsibility for any circuits shown or represent that they are free from patent infringement

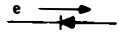
TEXAS INSTRUMENTS RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES AT ANY TIME IN ORDER TO IMPROVE DESIGN AND TO SUPPLY THE BEST PRODUCT POSSIBLE

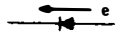
Figura 6-8

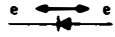
QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 6

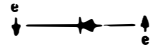
1. Un diodo è:
- ☐ a. Una valvola a senso unico per il flusso dell'elettricità
- ☐ b. Un semiconduttore fondamentale largamente usato nei calcolatori digitali
- ☐ c. Un semiconduttore relativamente semplice e perciò economico
- ☐ d. Tutti i punti di cui sopra
- ☐ e. Come in a e b

2. La corrente elettronica scorre in un diodo in questa direzione:

☐ a. 

☐ b. 

☐ c. 

☐ d. 

3. La corrente convenzionale scorre:
- ☐ a. Dal positivo al negativo
- ☐ b. Dal negativo al positivo
- ☐ c. In direzione opposta al flusso di elettroni
- ☐ d. Come in a e c
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

4. In un circuito alimentato da una batteria, gli elettroni vengono pompati:
- ☐ a. Dal terminale negativo al terminale positivo
- ☐ b. Dal terminale positivo al terminale negativo
- ☐ c. Avanti e indietro da un terminale all'altro
- ☐ d. Nulla di tutto ciò

5. Benché immaginario, il concetto di corrente convenzionale, o positiva, viene comunemente usato, oggigiorno, perché:
- ☐ a. Cambiare sistema sarebbe troppo fastidioso e costoso
- ☐ b. Gli effetti elettrici sono esattamente gli stessi, sia che pensiate che la corrente convenzionale vada in un senso, sia che pensiate che la corrente elettrica vada nell'altro senso.
- ☐ c. Gli ingegneri elettrotecnici si trovano generalmente molto bene con il concetto della corrente convenzionale
- ☐ d. Come in tutti i punti di cui sopra
- ☐ e. Nulla di tutto ciò.

6. Un diodo:
- ☐ a. É una perfetta valvola a senso unico e arresta il flusso di tutti gli elettroni in senso inverso
- ☐ b. Non arresta la dispersione di tutti gli elettroni in senso inverso
- ☐ c. É un dispositivo attraverso il quale non scorre corrente quando la tensione all'anodo è uguale a quella al catodo
- ☐ d. Come in a e c

7. I data sheet:
- ☐ a. Contengono le informazioni elettriche fondamentali che ci occorre conoscere su un diodo
- ☐ b. Indicano quanti dati logici un diodo può elaborare
- ☐ c. Contengono le specifiche meccaniche fondamentali di un diodo
- ☐ d. Tutto come sopra
- ☐ e. Come in a e c

Fate uso della riproduzione di un data sheet della TI per un diodo 1N4148 (Figure 6.7 e 6.8) per determinare certe caratteristiche fondamentali a 25° C (temperatura ambiente) per le domande 8, 9 e 10

8. La dissipazione di potenza nominale di questo dispositivo è:
- ☐ a. 500 mW (milliwatt)
- ☐ b. 75 V (Volt)
- ☐ c. 4 V
- ☐ d. 50 μA (microampere)
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

9. La caduta di tensione diretta a 10 mA (milliampere) di corrente è non più di:
- ☐ a. 1 V
- ☐ b. 75 V
- ☐ c. 2 μA
- ☐ d. 5 V
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

10. La tensione inversa di breakdown a 100 μA di corrente è non meno di:
- ☐ a. 100 V
- ☐ b. 75 V
- ☐ c. 1 V
- ☐ d. 50 μA
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

11. Il tempo di recupero inverso non è più di:
- ☐ a. 1 nanosecondo
- ☐ b. 4 nanosecondi
- ☐ c. 1 mA
- ☐ d. Indeterminato
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 7

Policristallino Costituito da numerosi minuscoli cristalli uniti insieme in modo disordinato. Questa è la forma in cui il silicio o il germanio emerge dall'operazione di purificazione chimica.

Monocristallino Costituito da un unico cristallo continuo. Questa è la forma richiesta per il materiale semiconduttore usato nei dispositivi elettronici.

Epitassiale Ottenuto facendo crescere uno strato di silicio monoscristallino, partendo da *vapore* di silicio. Il vapore, di solito, contiene un gas "drogante", per produrre una giunzione P N o per produrre uno strato "drogato" più leggermente dello stesso tipo del substrato.

Lega Metodo per fare una giunzione PN fondendo un "drogante" metallico in modo che esso sciolga una parte del materiale semiconduttore e poi si indurisca per produrre una "lega drogata".

Giunzione Diffusa Metodo di produzione delle giunzioni PN per esposizione di un'area mascherata di materiale semiconduttore riscaldato a un "drogante" gassoso (P o N) che lo impregna fino a una certa profondità.

Diffusione Planare Metodo di diffusione consistente nel far crescere delle giunzioni PN, in cui tutte le giunzioni emergono alla superficie superiore piatta della piastrina.

Diffusione Mesa Metodo di diffusione consistente nel far crescere delle giunzioni PN, in cui sull'intera piastrina si crea un'unica regione di base. Si impiega dell'acido per ricavare degli avvallamenti fra gli emettitori, lasciando delle alture a forma di tavola (mesas) di materiale trattato per ottenere elementi transistori.

CAPITOLO 7

I TRANSISTORI: COME FUNZIONANO E COME SONO FATTI

Poichè è trascorso un po' di tempo da quando avete letto il capitolo 2, fermiamoci un momento per rivedere la funzione di un transistore in un circuito.

COSA FA UN TRANSISTORE?

Vi ricorderete che un transistore può essere usato come amplificatore o come commutatore. La Figura 7.1 illustra una tipica applicazione di amplificazione:

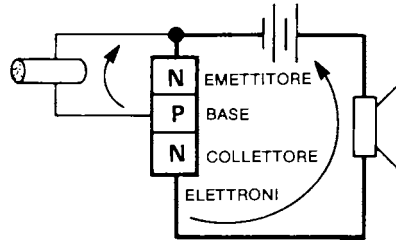


Figura 7.1

un transistore NPN che amplifica la corrente proveniente da un microfono per eccitare un altoparlante. Parlando ora in termini di corrente *elettronica,* il microfono converte la potenza delle onde sonore in onde di corrente elettrica. Il microfono pompa dei riflussi di elettroni fuori dalla base (regione P) del transistore. Quando non c'è nessuna onda sonora che azioni il microfono, il transistore blocca la corrente inviata dall'alimentatore nel circuito di lavoro. Ma quando degli elettroni sono estratti dalla regione P del microfono, una quantità molto maggiore ma proporzionale di elettroni scorrerà dall'emettitore al collettore e proseguirà attraverso il circuito fino all'altoparlante.

Vi ricorderete che avevamo bisogno del transistore perchè la corrente prodotta dal microfono è così piccola che essa non può azionare direttamente l'altoparlante. Così, ci occorre più potenza - e noi la otteniamo dall'alimentatore, che in questo caso, è una batteria. Il transistore *regola* il flusso di elettroni proveniente dalla batteria e produce una copia amplificata del molto più debole segnale microfonico.

Sulla base della nostra discussione dei diodi, potete vedere che questo processo di amplificazione è dovuto al movimento di elettroni liberi, di lacune positive

nel materiale semiconduttore del transistore. Vedremo fra un momento come ciò avviene. Ma richiamiamo come funziona un transistore nell'altro genere di applicazioni, *la commutazione.*

In Figura 7.2 è indicata la nostra ormai familiare applicazione di un transistore commutatore: un sistema telegrafico in trasmissione e ricezione. Vi ricorderete che l'interruttore nel circuito di controllo produce dei punti e delle linee, ma la grande

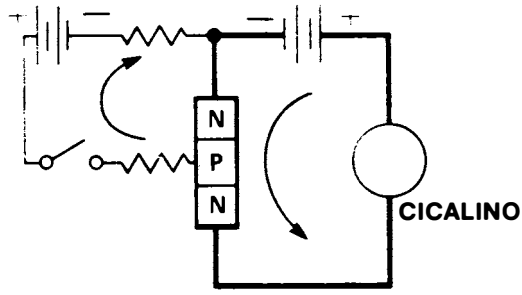


Figura 7.2

lunghezza di filo fra l'interruttore e il ricevitore ha una resistenza così grande che il segnale del circuito di comando è troppo debole, una volta che esso sia arrivato, per azionare il cicalino. Man mano che il circuito di controllo pompa degli elettroni fuori dalla regione P, la tensione elettronica nella base si abbassa fino a scendere al disotto della soglia di commutazione. Allora, il transistore si "mette a condurre" una gran quantità di elettroni provenienti all'alimentatore per azionare il cicalino.

Che cos'è questa "soglia" che abbiamo menzionato poco fa? La tensione di soglia di un transistore al silicio è, pressapoco, uguale a quella di un diodo al silicio - che è di circa 0,6 V. Quando richiamiamo abbastanza elettroni dalla regione P, da produrre una differenza di tensione diretta di circa 0,6 V ai capi della giunzione emettitore - base, il transistore andrà in uno stato di "conduzione", semprechè continuiamo a prelevare elettroni dalla base, in modo tale che nel circuito di lavoro possa scorrere una corrente proporzionalmente maggiore. Diremo di più sulla "soglia" nelle pagine seguenti.

QUAL E' LA DIFFERENZA FRA UN TRANSITORE COMMUTATORE E UN TRANSISTORE AMPLIFICATORE?

Certi transistori sono costruiti in modo da funzionare meglio come commutatori, altri sono fatti in modo da funzionare meglio come amplificatori. Ma, in caso di bisogno, la maggior parte dei transistori può venir usata, sia per commutare che per amplificare. Il transistore del nostro sistema telegrafico, per esempio, potrà funzionare come amplificatore. Tuttavia, nella maggior parte dei casi, dovremo sacrificare delle buone prestazioni. Per questa ragione i transistori vengono generalmente classificati come amplificatori o commutatori, ma non con entrambe le funzioni.

Non è il transistore in sè stesso che determina se dovrà commutare o amplificare, ma, piuttosto il circuito di controllo, il dispositivo che controlla il transistore, che ne determina il funzionamento nell'uno o nell'altro modo.

COME FUNZIONA UN TRANSISTORE?

Vi avevamo promesso che molti dei principi dei diodi ed il loro comportamento ci avrebbero aiutato nello studio degli altri semiconduttori. Queste nozioni di base danno ora i loro frutti per comprendere come funziona un transistore. La Figura 7.3 dà una sezione schematica di un elemento di transistore NPN.

Ricorderete che il materiale semiconduttore di tipo N conduce l'elettricità per mezzo della sua scorta di elettroni liberi e che il tipo P conduce, grazie alla sua scorta di lacune cariche positivamente.

In questa discussione, consideriamo la corrente composta di elettroni. Noterete che la regione P del nostro transistore è molto più stretta delle regioni N. Questa regione P è anche molto meno "drogata" delle giunzioni N; vale a dire che le lacune sono in minor numero e più distanziate, in confronto agli elettroni liberi contenuti nella regione N.

Supponiamo di pompare degli elettroni liberi dal terminale di emettitore al terminale di collettore e ragionate come abbiamo fatto nelle nostre precedenti discussioni sui diodi, si verifica un fatto sorprendente. Gli elettroni liberi continuano allegramente per la loro strada, dalla regione N dell'emettitore, attraverso la regione P della base, alla regione N del collettore e via di seguito per il filo. Questo processo continuerà solo per un breve istante di tempo, ma dobbiamo comprenderlo se vogliamo apprezzare pienamente il funzionamento del transistore.

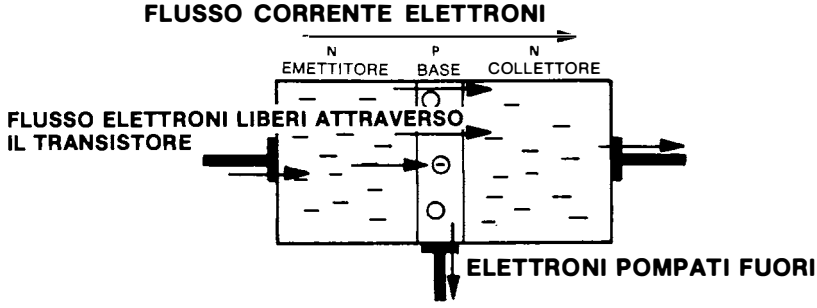


Figura 7.3

Voi penserete che qui qualche cosa non vada. La regola che abbiamo appreso, parlando dei diodi, è che gli elettroni *possono* scorrere da N a P, ma *non possono* scorrere da P a N. Poichè ciò vale anche nel caso attuale, come possono gli elettroni, una volta entrati nella mesa, passare nel collettore? Vi potreste aspettare che questi elettroni liberi vengano catturati nell'area di base, cadendo nelle lacune, per cui nessun elettrone passa dalla base al collettore. La spiegazione del mistero è che

il transistore è fatto con una regione di base molto stretta che è *"drogata"* molto *leggermente,* per cui le lacune sono in ordine sparso. Così avviene che la maggior parte degli elettroni emessi - tipicamente il 98% - può attraversare questa terra di nessuno senza cadere in una lacuna.

Tuttavia, i pochi elettroni che, *invece,* cadono nelle lacune, vi rimangono intrappolati. Essi si accumulano nella regione di base, ammassando una carica negativa nella base. Questo è ciò che permette al transistore di eseguire il suo compito riducendo la corrente di lavoro emettitore - collettore. Ricordatevi che cariche simili si respingono.

Gli elettroni vincolati in eccesso nella regione di base respingono gli elettroni liberi che cercano di passare dall'emettitore al collettore, rendendo più difficile il passaggio a questa corrente. Non ci vuole molto tempo - forse 50 nanosecondi - perchè la corrente venga interamente bloccata.

Arrestiamoci un momento a considerare la natura di questa barriera che blocca il flusso di corrente. Si noti che le regioni di emettitore e di base formano una giunzione PN, ossia un diodo. Noi sappiamo, adesso, che per avere una conduzione diretta apprezzabile attraverso questa giunzione di diodo, come in qualunque diodo, la pressione della tensione elettronica nell'emettitore dev'essere almeno di 0,6 Volt più alta della tensione nella base. Ma gli elettroni in eccesso, che si sono ora accumulati nelle regione di base, hanno *alzato* la pressione degli elettroni nella base ad un livello tale che la differenza è minore dei 0,6 Volt richiesti. Così, nessun elettrone scorre più attraverso questa giunzione.

L'unico modo per far sì che la corrente di lavoro ricominci ad affluire, consiste nel sottrarre alcuni degli elettroni vincolati in eccesso dalla regione di base. Ciò avviene applicando una pressione di tensione di elettroni *più bassa* al terminale di base e,"succhiando" fuori degli elettroni vincolati nel circuito di controllo. Ciò crea delle nuove lacune nella base, tendendo a ripristinare il giusto numero di lacune e abbassando la pressione di tensione degli elettroni nella base. Con questo abbassamento della barriera, fornita dalla pressione degli elettroni, riprende la corrente di elettroni dall'emettitore al collettore. Per ogni elettrone richiamato dalla base, tipicamente, 50 elettroni passano dall'emettitore al collettore prima che uno di essi cada in una lacuna. Così la piccola corrente di base controlla proporzionalmente la maggior corrente di lavoro.

Abbiamo ancora molto da dire sulle caratteristiche dei transistori ma, prima, vediamo come sono fatti.

COME VENGONO COSTRUITI I SEMICONDUTTORI?

La costruzione dei semiconduttori può essere suddivisa in tre operazioni fondamentali. Per prima cosa viene la *preparazione* del materiale, che consiste nel produrre del silicio (o del germanio o certi composti di semiconduttori) pure monocristallino (a un solo cristallo), opportunamente "drogato" come tipo N e tipo P nelle regioni desiderate. La seconda operazione è *l'assemblaggio meccanico.* I minuscoli chip di un cristallo, opportunamente "drogato",devono venir corredati di fili terminali, così da poterli collegare nei circuiti elettrici del sistema e il dispositivo deve venir racchiuso entro una custodia per proteggerlo da eventuali danni e contaminazioni. Terzo, il prodotto deve venir *provato* per assicurarsi del suo buon funzionamento.

Adesso, diamo uno sguardo più dettagliato ai processi di costruzione che forniscono il gran volume di prodotti semiconduttori richiesti dai moderni sistemi elettronici.

COME VIENE PREPARATO IL MATERIALE?

Alcuni costruttori di semiconduttori cominciano con il triclorosilane, un composto chimico liquido che contiene una gran quantità di silicio, il quale, a sua volta, è stato estratto dalla sabbia ordinaria. La prima operazione consiste nel purificare questo silicio grezzo mediante un trattamento chimico, ottenedone del silicio metallico policristallino puro ("policristallino" significa "fatto di molti cristalli diversi" e anche un unico minuscolo pezzo di questo materiale ha molti cristalli, tutti mescolati alla rinfusa). Alla TI di Dallas, per esempio, abbiamo uno stabilimento chimico in cui viene raffinato molto del silicio per semiconduttori usato in tutto il mondo. Molti costruttori di semiconduttori comprano il silicio in questa forma raffinata, ma esso è pur sempre *poli*cristallino. Occorre pertanto un ulteriore trattamento.

La fase successiva di preparazione del materiale è chiamata "coltivazione (o accrescimento) del cristallo" (Figura 7.4). Scopo di questa operazione è di produrre

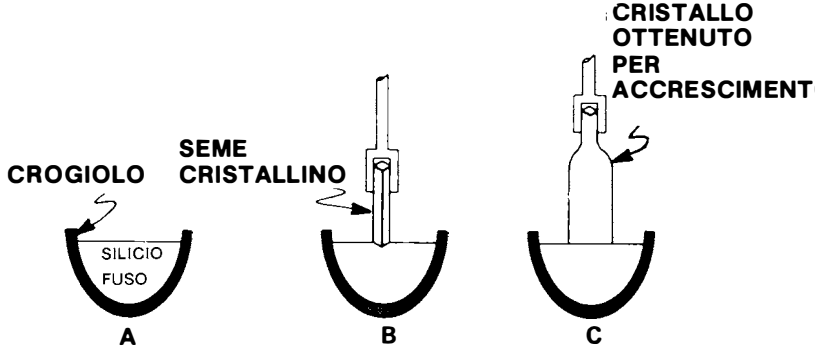


Figura 7.4

del silicio *mono*cristallino ("monocristallino" significa una disposizione ordinata e continua di atomi per formare un cristallo). In questo processo, una certa quantità di silicio policristallino viene fusa in un crogiuolo avente circa le dimensioni di una tazza da tè. Successivamente, un piccolo seme di silicio monocristallino (avente circa le dimensioni di una gomma da cancellare) viene calato nel crogiuolo quel tanto che basta per toccare la superficie del silicio fuso. Poichè il seme è più freddo, il silicio fuso comincia a cristallizzarsi sul seme, riproducendo la struttura cristallina del seme stesso. Crescendo, esso rimane monocristallino. Il seme viene, lentamente ma continuamente, sollevato via dal metallo fuso e una quantità sempre maggiore del materiale fuso si accumula formando un grosso cristallo. Per mantenere uniforme l'accrescimento, il cristallo e il recipiente vengono fatti ruotare in direzioni opposte, man mano che il cristallo viene tirato su.

Il prodotto finito è un cilindro dalle dimensioni di una carota, che contiene abbastanza silicio monocristallino puro da fornire milioni di transistori o di diodi, quando viene segato in minuscoli chip. In ciascuno dei chip, tutti gli atomi sono allineati esattamente nella giusta configurazione, o reticolo cristallino, per produrre un semiconduttore.

Successivamente, questo silicio puro deve venir trattato in modo da avere del materiale di tipo P e del materiale di tipo N al posto giusto. Vi sono parecchi modi per ottenere ciò, ma tutti cadono in tre categorie: giunzione ad accrescimento, giunzione a lega e giunzione a diffusione.

COME DI FA, CON LA TECNICA DELLA "GIUNZIONE AD ACCRESCIMENTO" A PRODURRE MATERIALE DI TIPO P E DI TIPO N?

Ci sono due modi per far *crescere* le giunzioni PN: partendo da silicio fuso, o per deposizione partendo da un vapore (epitassiale). Il metodo per fusione non è più molto usato, ma è stato il primo metodo di produzione usato per fare dei transistori al germanio e il primo metodo per fare dei transistori al silicio. Immaginiamo la stessa attrezzatura indicata in Figura 7.4. Supponiamo che il materiale fuso nel crogiuolo sia già "drogato" per produrre del materiale di tipo N. Dopo aver ottenuto alcuni cristalli di tipo N, si lascia cadere nel silicio fuso una pastiglia di impurità del tipo P (circa delle dimensioni della capocchia di uno spillo). La pastiglia, cancella precisamente gli effetti dell'impurità di tipo N e fa si che il cristallo cominci a formare una regione di materiale di tipo P. Dopo pochi secondi - stabiliti con precisione - la regione P ha raggiunto lo spessore di circa un mezzo millesimo di pollice (12,7 micron) e si lascia cadere una pastiglia di materiale di tipo N. Questa cancella il tipo P e il cristallo ricomincia a far crescere del materiale di tipo N. Il risultato è una struttura NPN. Essa è molto simile a un sandwich, con uno strato sottile di materiale del tipo P fra due strati spessi di materiale del tipo N. E come un sandwich viene tagliato in minuscoli tramezzini da aperitivo, ciascuno avente gli stessi tre strati, il cristallo a giunzione per accrescimento può venir tagliato in molte sbarrette contenenti gli stessi tre strati.

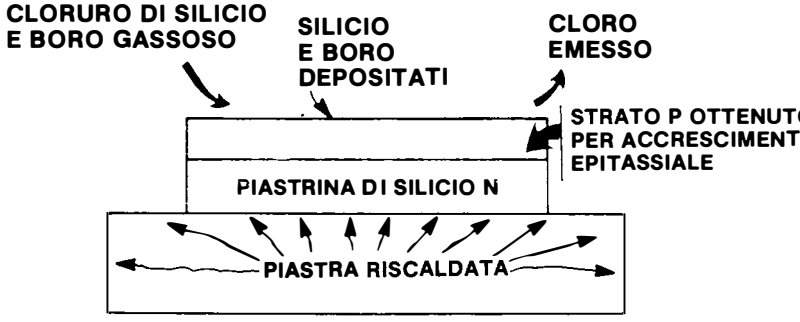


Figura 7.5

Oggigiorno, un metodo molto più usato per ottenere una giunzione ad accrescimento è quello chiamato a "crescita epitassiale" ("epitassiale" significa cristallo ottenuto per accrescimento a partire da un vapore). In questa tecnica, la prima operazione consiste nel far crescere una sbarra completa di silicio, per esempio a "drogaggio" di tipo N. La sbarra viene quindi segata in dischi sottili o "wafer", in modo simile a quando si affetta una pagnotta. Ogni disco viene molato per renderlo piatto e lucidato fino ad essere levigato come uno specchio. Una piastrina di tipo N viene

posta su una piastra riscaldata in una camera chiusa, come in Figura 7.5. La piastrina viene riscaldata dal disotto. Si pompa nella camera del cloruro di silicio gassoso. Quando il gas colpisce la piastrina di silicio calda, esso si decompone e lascia del silicio monocristallino depositato sulla piastrina. Poichè il gas, in questo caso, avrà una piccola quantità di impurità del tipo P, come il boro, lo strato cresciuto epitassialmente sarà del tipo P. In questo modo abbiamo ottenuto una giunzione PN. Il più delle volte l'accrescimento epitassiale non viene portato più oltre e l'altra regione N viene aggiunta con la tecnica di diffusione, che studieremo poi.

COME SI PRODUCONO LE GIUNZIONI COL METODO DELLA LEGA?

Il secondo metodo fondamentale per produrre delle giunzioni per semiconduttori è il metodo a lega. Benchè questo metodo sia stato usato per produrre miliardi di transistori e di diodi al germanio, relativamente pochi dispositivi al silico vengono fatti in questo modo, principalmente a causa dei problemi che sorgono in seguito all'elevato punto di fusione del silicio. Tuttavia, per evitare confusioni, faremo uso, per spiegare il processo, di un diodo al silicio a lega.

Nella tecnica a lega, la prima operazione fatta consiste nel coltivare un cristallo del tipo N. Successivamente, il cristallo viene tagliato in piastrine, e le piastrine vengono poste su un vassoio piatto (Figura 7.6). Sulla piastrina viene posato un disco di grafite avente lo stesso diametro della piastrina stessa. In questo disco sono stati praticati molti forellini. In ciascuno di questi forellini viene collegata una minuscola pallina d'alluminio puro, in modo tale che le palline poggino sul silicio. L'alluminio, proprio come il boro, è un'impurità di tipo P - così le palline di alluminio, in questo caso, servono da "drogaggio" di tipo P.

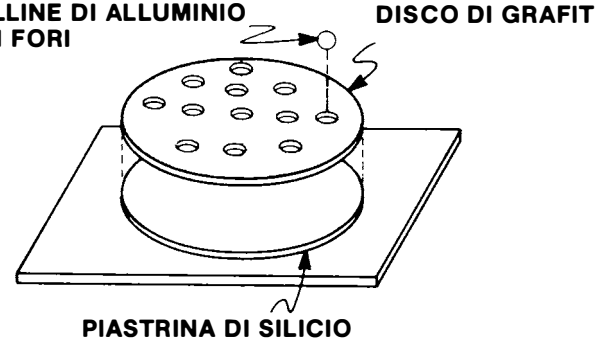


Figura 7.6

Il vassoio con la piastrina, il disco di grafite e le palline di alluminio, vengono posti in un forno, che è a temperatura abbastanza alta da far fondere l'alluminio. Una parte dell'alluminio fuso scioglie un pò del silicio sottostante - proprio come una goccia d'acqua che resta su un cubetto di zucchero scioglie una parte dello zucchero. A questo punto, l'alluminio fuso si mescola con il silicio. Diciamo che l'alluminio "fa lega" con il silicio.

Il complesso viene poi tolto dal forno e l'alluminio s'indurisce. Ciò lascia dell'alluminio puro in alto, una lega di alluminio-silicio nel mezzo (la nostra regione P) e il nostro originario silicio di tipo N sul fondo.

Successivamente, per evitare un corto circuito fra l'alluminio e il silicio di tipo N intorno al bordo del puntino, l'intera piastrina viene immersa o risciacquata in un acido che scioglie il silicio ma non l'alluminio. Con ciò si elimina la superficie di silicio fuorchè dove esso è protetto dalla pallina di alluminio.

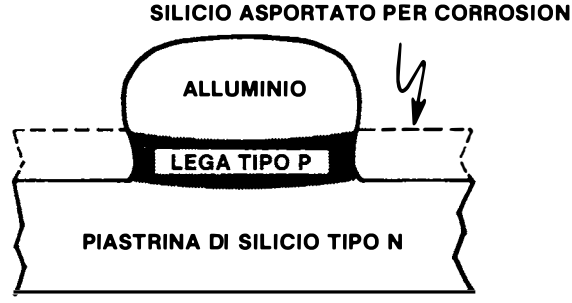


Figura 7.7

Come indicato in Figura 7.7, questo processo ci dà una piastrina con molti piccoli piedistalli di tipo P, ognuno incappucciato di alluminio.

La piastrina viene quindi segata per separare uno dall'altro i piccoli elementi di diodo. Ogni elemento viene poi montato in una custodia per ottenere un dispositivo finito. In Figura 7.8 si può vedere questo montaggio, costituito da un manicotto di

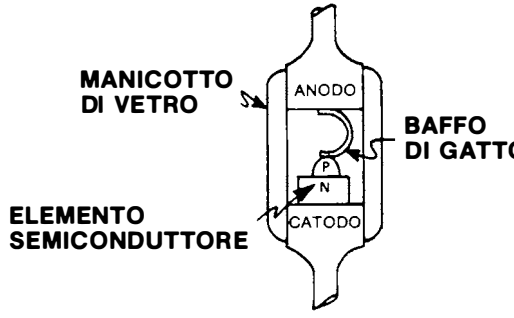


Figura 7.8

vetro con i terminali di catodo e anodo fissati agli estremi. Il lato N dell'elemento semiconduttore è attaccato alla spina catodica. Giù dal terminale anodico è riportato un minuscolo "baffo di gatto" o filo o nastro metallico ricurvo, che fa contatto con la borchia di alluminio. Questo è, quindi, un diodo a lega al silicio.

E' abbastanza facile vedere come potreste prendere la stessa piastrina prima che essa venga segata via, capovolgerla e ottenere per lega dei punti sull'altra faccia. Con ciò si produrrebbero degli elementi PNP del genere di quelli che usiamo nei transistori. Buona parte dell'arte di fare i transistori a lega sta nel controllare la profondità della lega da entrambi i lati, in modo tale da ottenere la strettissima regione di base di cui abbiamo parlato. Se la temperatura del forno è di pochi gradi troppo bassa o il tempo di permanenza nel forno è di pochi secondi troppo breve, otteniamo una regione di base così spessa che essa cattura troppi elettroni. Per contro, se la temperatura è troppo elevata o il tempo nel forno è troppo lungo, la lega passa da parte a parte l'intera regione di base, facendo contatto con la lega dell'altra parte. In questo caso, potremo aver fatto un buon fusibile ma non un transistore. I seri problemi da risolvere per controllare dei fattori come questi alle alte temperature richieste dalla lavorazione silicio, sono le principali ragioni per cui il processo a lega non è mai stato largamente usato per fare dei transistori al silicio - ma esso ha funzionato brillantemente per il germanio e per certi tipi di diodi, essendo al silicio.

Per inciso, in un transistore, la pallina che noi usiamo per formare la regione del collettore è più grande della pallina dell'emettitore, principalmente perchè gli elettroni liberi provenienti dall'emettitore tendono a irradiarsi in tutte le direzioni nella base - per cui il collettore, essendo più grande, li raccoglie meglio.

CHE COS'E' IL PROCESSO DI GIUNZIONE PER DIFFUSIONE?

Il processo di giunzione per diffusione è largamente usato per fare transistori e, praticamente, tutti i circuiti integrati vengono costruiti in questo modo.

Il processo di giunzione a diffusione comincia anch'esso con una piastrina di silicio monocristallino. Nel nostro esempio (Figura 7.9), usiamo del silicio di tipo N

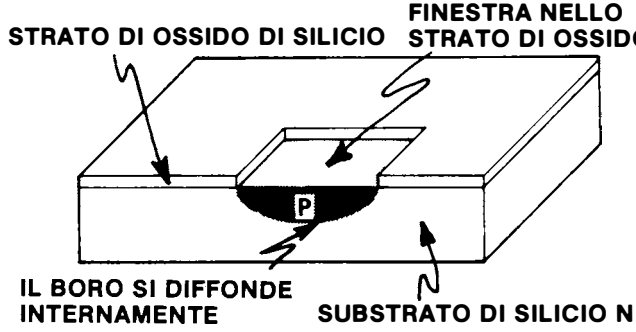


Figura 7.9

per il substrato ("substrato" significa semplicemente "strato sottostante"). La superficie superiore di questo substrato viene fatta ossidare, per cui essa è completamente ricoperta da uno strato a tenuta ermetica di sostanza protettiva (ossido di silicio). Questo strato di ossido, a sua volta, viene rivestito con un materiale chiamato "photoresist". Il photoresist è sensibile alla luce un po' come una pellicola fotografi-

ca. Quando a questo photoresist si sovrappone una certa specie di negativa fotografica chiamata "photomask" e si invia su di essa la luce, la luce passa attraverso delle zone prescelte della maschera e provoca dei cambiamenti chimici in queste parti del photoresist. Adesso, la piastrina può venir sottoposta a lavaggio e le parti prescelte di photoresist vengono asportate scoprendo lo stato di ossido nelle zone prescelte. E poichè il photoresist resiste all'attacco dei reagenti chimici, la piastrina può ora venir lavata con dei reagenti chimici, per aprire delle finestrature nello strato di ossido, come indicato in figura.

Ogni piastrina ha centinaia o migliaia di tali finestrature. Se stiamo facendo dei tipici transistori per piccoli segnali, ogni finestra misura da una parte all'altra circa venti millesimi di pollice (500 micron). Se stiamo facendo dei circuiti integrati, come vedremo in un prossimo capitolo, queste finestre possono essere ancora più strette di un mezzo millesimo di pollice (13 micron).

La piastrina così preparata, con lo strato di ossido di silicio corroso chimicamente funzionante come uno stampino, viene quindi messa in un forno e riscaldata ad una temperatura prossima al punto di fusione del silicio. Del boro gassoso viene pompato nel forno ed esso colpisce il silicio dove le finestre lo hanno lasciato esposto. Il boro si *diffonde* nel cristallo di silicio nell'area di ogni finestra. Questa diffusione avviene con il processo di assorbimento analogo a quello per cui una spugna si imbeve d'acqua. Gli atomi di boro prendono il posto di una piccola percentuale di atomi di silicio nella struttura cristallina; lentamente, per varie ore, essi si fanno strada verso il basso entro il cristallo di silicio. Il boro, naturalmente, è un "drogante" di tipo P. Così, dovunque esso arriva, il silicio diventa del tipo P. Quando il boro si è diffuso fino alla giusta profondità, dando luogo ad uno strato di silicio del tipo P, la piastrina viene tolta dal forno e la diffusione si arresta.

Adesso, un nuovo strato di ossido di silicio viene generato sull'intera superficie della piastrina, finestre comprese. Ancora una volta, delle nuove finestre più piccole vengono aperte in questo strato. Ognuna di *queste* finestre si trova nell'area di ognuna delle vecchie finestre. Rimettiamo la piastrina nel forno e, questa volta, esponiamola a del *fosforo* gassoso. Gli atomi di fosforo si diffondono nelle aree delle finestre e soppraffanno gli effetti del boro in una piccola regione entro la regione P, convertendo il silicio in questa piccola area in materiale di tipo N. Nella Figura

Figura 7.10

7.10 si vede questa nuova regione N. E' facile ora vedere la struttura del transistore: uno strato di materiale di tipo P fra due strati di materiale di tipo N.

Per facilitarne il contatto con questi strati per mezzo di fili terminali, rivestiamo (galvanicamente) la superficie di ogni regione con un sottile strato metallico. Questo processo viene chiamato "metallizzazione". Il processo impiega delle tecniche di fotomascheratura del tipo di quelle che abbiamo appena visto. Come si può vedere in Figura 7.11, un sottile strato di alluminio viene depositato sulla regione

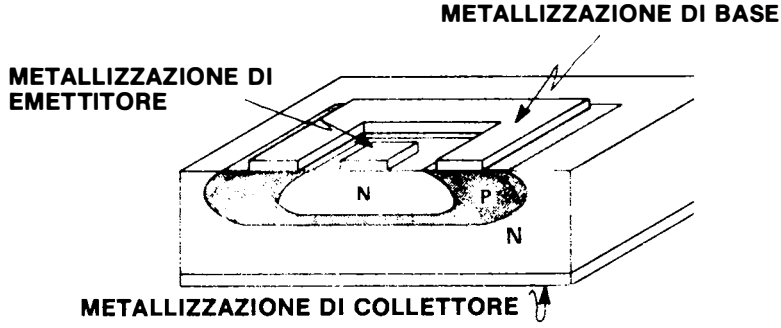


Figura 7.11

dell'emettitore e uno strato simile viene depositato sulla regione di base. Sul fondo della piastrina viene depositato uno strato d'oro. Ciò assicura, non solo un buon contatto elettrico con il collettore ma anche un "saldante" di alta qualità, per attaccare intimamente il chip al metallo della custodia.

Si ha, così, un forte legame fisico, nonchè una larga area, attravero la quale il calore si può dissipare verso la custodia e nell'ambiente esterno.

Nella fabbricazione effettiva, naturalmente, varie centinaia di questi elementi transistori vengono formati sulla stessa piastrina e poi segati via uno dall'altro, dopo che il processo è stato completato. Uno dei principali vantaggi del processo di diffusione è di non richiedere più tempo o mano d'opera, per lavorare un'intera piastrina piena di transistori, di quanto ce ne vorrebbe per ottenere un unico transistore.

COSA SONO I PROCESSI DI DIFFUSIONE PLANARE E MESA?

Il transistore a diffusione che abbiamo ora descritto è un esempio di dispositivo a diffusione *planare*. Esso viene chiamato "planare" perchè, come suggerisce la Figura 7.12, tutte le regioni (N, P e N) ed entrambe le giunzioni appaiono alla superficie superiore della piastrina in un *piano*.

Ma c'è un'altra sottocategoria del processo di diffusione chiamato "mesa". La descriveremo fra breve.

Finchè, però, abbiamo davanti la Figura 7.12, accenniamo ad una variante del processo planare chiamata "planare epitassiale". In questo processo, come indicato nella figura, una regione N leggermente "drogata" può venir fatta crescere epitassialmente sulla superficie superiore di un substrato fortemente "drogato" di cristallo tipo N (chiamato N +). Questo processo dà una regione di collettore leggermente "drogata", il che è molto desiderabile dal punto di vista della capacità di resistere a

tensioni elevate. Esso produce, inoltre, un cammino a bassa resistenza fortemente "drogato" per la corrente che va al contatto del collettore.

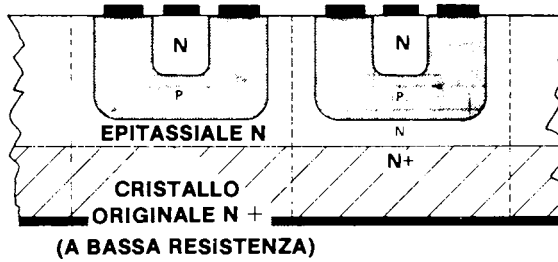


Figura 7.12

Veniamo ora al processo mesa. Dalla Figura 7.13 si può vedere perchè il processo ha preso questo nome - la lavorazione dà ad ogni elemento la forma di una minuscola montagna a cima piatta, o "mesa", come tale tipo di montagna viene chiamato nel sud-ovest degli Stati Uniti. Vi ricorderete che, nel processo planare, le regioni di base del tipo P venivano diffuse separatamente attraverso delle finestre aperte nell'ossido di silicio; nel processo mesa, invece, un'*unica* regione P viene diffusa o depositata epitassialmente sull'*intera* superficie della piastrina. Quindi, le regioni di emettitore di tipo N vengono diffuse singolarmente nella piastrina; come nel processo planare. Successivamente, per prevenire eventuali danni alle giunzioni

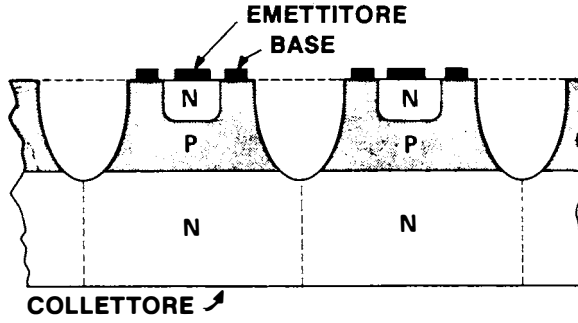


Figura 7.13

collettore-base quando i chip vengono segati via uno dall'altro, si corrode il metallo con dell'acido, ricavando dei piccoli avvallamenti fra un dispositivo e l'altro. Poi, i dispositivi vengono separati segando lungo le linee tratteggiate che partono dal fondo degli avvallamenti verso il basso.

Un vantaggio del processo mesa rispetto a quello planare è che esso produce meno difetti nella piastrina. Per contro, il processo planare è intrinsecamente più economico. Non possiamo qui esaminare tutti i pregi e i difetti dei vari processi. Basti dire che un progettista di semiconduttori deve venire a un gran numero di complicati compromessi fra tutti i fattori che determinano le prestazioni, l'affidabilità e il

costo, quando decide le fasi di lavorazione da adottare. In molti casi, queste decisioni sono così complesse che i progettisti devono ricorrere all'aiuto di grandi calcolatori che li assistono nello scegliere le migliori possibili combinazioni dei processi.

Abbiamo fin qui parlato delle tre categorie fondamentali di metodi per la preparazione dei materiali: ad accrescimento, a lega e a diffusione. Abbiamo anche discusso diverse importanti varianti di questi processi. A questo punto, i semiconduttori sono stati creati, ma essi sono nudi, indifesi e senza comunicazioni con il mondo esterno. I prossimi passi sono i processi di assiemaggio che li trasformeranno in dispositivi pratici e utilizzabili. Come esempio, prendiamo gli assiemaggi dei transistori a diffusione.

COME VENGONO ASSIEMATI I TRANSISTORI A DIFFUSIONE?

La Figura 7.14 mostra come il chip a diffusione sia montato entro una custodia metallica. Il chip viene fissato alla piattaforma dorata dello "heard" (zoccolo di testata) con un processo di riscaldamento, che permette al chip stesso di formare una lega con la doratura. Tipicamente, la piattaforma vera e propria serve da terminale di collettore e viene collegata ad uno dei terminali esterni. I terminali di emettitore e di base sono isolati dalla piattaforma da vetro, una parte del quale è indicata nel disegno con anelli grigi.

Dei sottili fili d'oro - circa del diametro di un capello - sono saldati alle aree metalizzate, che fanno contatto con le regioni di emettitore e di base. Gli altri estremi di

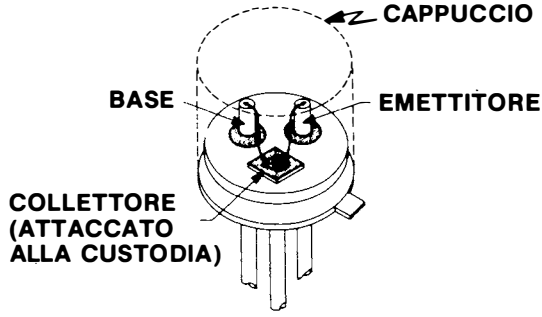


Figura 7.14

questi fili sono attaccati ai terminali esterni, che vanno al mondo esterno. Dopo fatte queste tre connessioni, alla header viene saldato un cappuccio di protezione. Il transistore è ora completo e pronto per essere provato.

Un altro modo di montare i transistori consiste nell'incapsularli in un blocco di plastica. Tipicamente tre terminali appiattiti agli estremi, come indicato in Figura 7.15, vengono temporaneamente serrati in un apposito attrezzo.

Il chip viene fissato mediante lega al terminale centrale e dei fili d'oro vengono attaccati agli altri terminali. Questo viene quindi posto in uno stampo, in cui si inietta del materiale plastico allo stato liquido. Potete vedere quanto siano robusti questi transistori, ogni parte dei quali è imprigionata in un blocco di plastica.

Abbiamo così descritto i processi fondamentali di preparazione del materiale e i processi di assiemaggio, usati praticamente per tutti i semiconduttori. Nella semplice forma riassuntiva descritta, questi processi ci sembreranno probabilmente molto più semplici di quanto immaginate. Ma non provate a fabbricare dei semiconduttori nel forno di casa vostra!

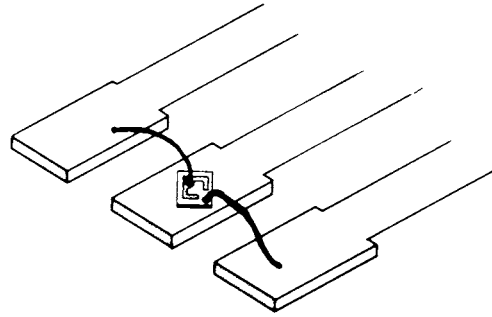


Figura 7.15

A questo punto, abbiamo finito di fabbricare i semiconduttori, ma essi non sono ancora pronti per la vendita. Anche se può sembrare strano, dobbiamo ancora provarli uno per uno per vedere esattamente cosa abbiamo fatto.

PERCHE' OGNI DISPOSITIVO DEVE VENIR PROVATO PER VERIFICARNE LE PRESTAZIONI ELETTRICHE?

Nella maggior parte delle moderne industrie, si provano degli *esemplari,* presi a caso, di prodotti finiti e si ammette che i prodotti *non provati* funzionino nello stesso modo. Ma nell'industria dei semiconduttori, ogni dispositivo dev'essere provato o "caratterizzato", prima di poter determinare il numero del suo tipo. Malgrado uno dei più sofisticati "know-how" del mondo e un'esperienza accumulata in più di due decenni, nessun produttore di semiconduttori può costruire un lotto di dispositivi che risultino tutti precisamente simili nel loro comportamento elettrico.

Così dobbiamo collaudare ogni semiconduttore collegando i suoi terminali ai circuiti di prova. A seconda dei risultati di queste prove - i dispositivi di un unico lotto sono sottoposti per intero alla stessa lavorazione - possono venir divisi in quattro o cinque diverse categorie e venduti con diversi numeri tipici. Naturalmente, i dispositivi che non rispondono alle specifiche vengono interamente scartati.

Ogni dispositivo deve soddisfare certi differenti limiti di misura come specificato nel suo data sheet. Il collaudo e la caratterizzazione danno la sicurezza che il dispositivo sia compreso entro i limiti specificati di tensione diretta, corrente inversa e molte altre caratteristiche che vi sono ora familiari, almeno per quanto riguarda i diodi.

Benché queste prove possano venir eseguite normalmente, facendo uso di apparecchiature da banco piuttosto semplici, i prodotti impiegano dei sistemi di prova

altamente automatizzati, come le macchine CAT sviluppate della TI (CAT sta per "computer automated testing"). Queste macchine smaltiscono migliaia di dispositivi all'ora provando e misurando automaticamente molte caratteristiche, analizzando i risultati delle prove per determinare il corretto tipo di dispositivo e depositando i dispositivi nelle corrispondenti tramogge. Molti dispositivi vengono, inoltre, sottoposti a prove di vita operativa, nelle quali i transistori vengono effettivamente fatti funzionare giorno e notte per settimane, spesso in forni ad alta temperatura, per esser certi che essi si comportino in modo affidabile, in condizioni-ambiente estreme.

Entreremo in qualche altro dettaglio di fabbricazione nei prossimi capitoli - nel discutere i circuiti integrati, per esempio, vedremo come si impieghi il processo planare per produrre dei complicati circuiti completi su un unico chip o un'unica piastrina di silicio. Nel capitolo seguente, cominceremo a discutere le caratteristiche dei transistori.

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 7

1. In un fondamentale circuito a transistori, il più significativo fattore che determina se il transistore si comporta come un commutatore o un amplificatore è:

☐ a. Il tipo di transistore
☐ b. Il circuito di controllo che fornisce il segnale in entrata al transistore
☐ c. Il circuito di lavoro
☐ d. Il montaggio (contenitore) del transistore
☐ e. Nulla di tutto ciò

2. In un transistore NPN si ha un'azione di commutazione e di regolazione:
☐ a. Richiamando degli elettroni dalla base del transistore, permettendo così a una quantità proporzionalmente maggiore di elettroni di scorrere dall'emettitore al collettore
☐ b. Aumentando il numero di elettroni nella regione di base
☐ c. Sostituendo un altoparlante al cicalino nel circuito
☐ d. Nulla di tutto ciò

3. Gli elettroni liberi possono scorrere in un transistore NPN dall'emettitore al collettore, con una buona probabilità di sfuggire alla cattura da parte di lacune nella base di tipo P perché:
☐ a. La base di tipo P è molto stretta e leggermente "drogata", cosicché le lacune sono rade e sparpagliate
☐ b. Gli elettroni vincolati in eccesso che possono respingere gli elettroni liberi vengono richiamati dalla regione di base dal circuito di controllo
☐ c. La pressione della tensione nel circuito di lavoro fa passare gli elettroni liberi
☐ d. Tutto come sopra

4. Il materiale fondamentale per la fabbricazione della maggior parte dei semiconduttori attuali è:
☐ a. Il silicio monocristallino
☐ b. La giunzione ad accrescimento
☐ c. Il boro gassoso
☐ d. L'idrato di alluminio tipo N e tipo P
☐ e. Come in b e d

5. Le giunzioni ad accrescimento, a lega ed a diffusione sono le tre tecniche generali per:
☐ a. L'assiemaggio meccanico dei semiconduttori
☐ b. Il collaudo elettrico dei semiconduttori
☐ c. La produzione di regioni di tipo P e di tipo N nelle posizioni volute nell'elemento semiconduttore di qualsiasi dispositivo semiconduttore
☐ d. Un'applicazione ristretta ai transistori
☐ e. Come in a e b

6. L'accrescimento epitassiale di un cristallo (accrescimento da un vapore piuttosto che da un liquido) viene principalmente usato per:
☐ a. Attuare il processo a lega
☐ b. Produrre una regione di collettore leggermente drogata sulla superficie superiore di una piastrina originaria più fortemente drogata per migliorare le prestazioni dei dispositivi a giunzione per diffusione

- ☐ c. Diffondere i droganti nella piastrina attraverso alle minuscole finestre aperte nell'ossido
- ☐ d. Come in a e c
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

7. Un grosso vantaggio del processo di difffusione è che:
- ☐ a. E' possibile la lavorazione manuale singola di ogni distinto elemento semiconduttore, conseguendo così un'alta qualità
- ☐ b. E' un processo breve a una sola operazione
- ☐ c. Non richiede più mano d'opera o tempo per produrre un'intera piastrina piena di centinaia di elementi semiconduttori di quanto non ne occorra per produrre solo un transistore su una piastrina
- ☐ d. Non richiede delle tecniche intricate e precise
- ☐ e. Come in b e d

8. I processi molto comunemente usati chiamati "planare" e "mesa"sono delle sottocategorie di quale metodo di produzione delle regioni di tipo P e N in un materiale semiconduttore?
- ☐ a. Giunzione ad accrescimento
- ☐ b. Giunzione a lega
- ☐ c. Giunzione a diffusione
- ☐ d. Come in a e b
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

9. La popolarità dei prodotti semiconduttori incapsulati in plastica sta crescendo rapidamente. Da quando è stato detto in questo capitolo sui transistori in plastica, perché si potrà avere questo fatto?
- ☐ a. Il contenitore in plastica contiene un chip di qualità più alta
- ☐ b. E' eliminata la necessità di attaccare i fili
- ☐ c. Il cosiddetto contenitore in plastica contiene un piccolo contenitore di metallo e, pertanto, presenta la miglior tenuta contro le contaminazioni.
- ☐ d. Un dispositivo in plastica è molto più economico di un corrispettivo dispositivo a custodia metallica
- ☐ e. Come in a e b

10. Dopo la preparazione del materiale e l'assiemaggio meccanico, l'operazione finale del collaudo elettrico è necessaria nella fabbricazione dei semiconduttori perchè:
- ☐ a. Purtroppo tutti i dispositivi preparati e assiemati nello stesso modo non risultano esattamente simili nel loro comportamento elettrico
- ☐ b. Va da sé che è desiderabile che tutti i dispositivi di un dato tipo siano più uniformi possibile nel loro comportamento elettrico
- ☐ c. Di solito, alcuni differenti tipi possono venir selezionati da semiconduttori di uno stesso lotto.
- ☐ d. I dispositivi che non funzionano del tutto devono essere interamente scartati
- ☐ e. Come in tutti i punti di cui sopra.

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 8

PNP Identico come principio ed applicazione al transistore NPN, solo che le posizioni e le funzioni del materiale tipo P e del materiale tipo N sono invertite, insieme con le funzioni delle lacune e degli elettroni liberi. In conseguenza, la corrente è anch'essa invertita, per cui un PNP è utile quando occorre un transistore da mandare in conduzione quando si preleva dalla base una corrente convenzionale.

Massima Dissipazione di Potenza Caratteristica e specifica di un semiconduttore, relativa alla quantità di calore che il dispositivo può sopportare prima di presentare delle disfunzioni. Viene talvolta espressa sotto forma di corrente, come la "massima corrente diretta" I_F per i diodi e la "massima corrente di collettore " I_C per i transistori.

Conduttività E' una misura di quanto facilmente un semiconduttore conduce. Per i transistori, la conduttività è rappresentata dalla caduta di tensione diretta V_{BE} ai capi della giunzione base-emettitore, per la corrente di *controllo* (o di comando) e dalla caduta di tensione V_{CE} lungo il cammino emettitore-collettore, per la corrente *di lavoro.*

Corrente di Dispersione Corrente non voluta, che scorre in un semiconduttore, in cui dovrebbe venir bloccata (I_{EE0} I_{CB0} etc).

Tensione di Breakdown Tensione alla quale si verifica un guasto di grandi dimensioni, nel tentativo di arrestare la corrente inversa ($V_{(BR)EBO}$, etc.).

Velocità di Funzionamento Per i transistori, questa specifica implica sia la velocità di commutazione che la velocità di amplificazione. La velocità di commutazione si può esprimere sotto forma di tempo di andata in conduzione (turn-on time = t_{on}), tempo di andata all'interdizione (turn-off time = t_{off}), di tempo di salita (rise time = t_r), o di tempo di caduta (fall time = t_f). La velocità di amplificazione viene espressa indicando la massima frequenza del segnale in entrata che può venir amplificata in modo soddisfacente. La velocità di funzionamento dipende principalmente dalla capacità.

Cifra di Rumore Dà la misura di quanto segnale non voluto viene generato nel processo di amplificazione, essendo il "rumore" conseguenza del turbolento e irregolare afflusso di elettroni.

Guadagno Rapporto fra il segnale in uscita (circuito di lavoro) e il segnale in entrata (circuito di controllo). Per un transistore NPN o PNP, il tipo di guadagno specificato nei data sheet è il guadagno di *corrente,* indicato con h_{FE} o h_{fe} e spesso chiamato "beta".

CAPITOLO 8

IL TRANSISTORE PNP E LE CARATTERISTICHE DEI TRANSISTORI

Finora, nella nostra trattazione sui transistori, abbiamo parlato esclusivamente del tipo NPN. Adesso, dobbiamo parlare del tipo ugualmente importante PNP, di come i due tipi differiscono uno dall'altro e di come essi vengono spesso usati a complemento uno dell'altro. Più avanti, in questo capitolo, discuteremo delle caratteristiche di entrambi i tipi.

IN CHE COSA UN TRANSISTORE PNP DIFFERISCE DA UN TRANSISTORE NPN?

Per quanto riguarda le loro *funzioni,* i transistori PNP e NPN fanno precisamente le stesse cose: entrambi commutano e amplificano l'elettricità. Essi hanno un aspetto simile e vengono fabbricati con gli stessi processi che abbiamo esaminato. Ma, un po' come le automobili inglesi con guida a destra e le automobili americane con guida a sinistra, essi sono esattamente il *contrario* l'uno dell'altro, nelle costruzioni e nel modo in cui funzionano.

Confrontiamoli, per vedere in che cosa essi sono diversi. La prima e più evidente delle differenze è che i compiti del materiale tipo N e del materiale tipo P sono *invertiti.* Il materiale tipo P viene usato nella base del transistore NPN, mentre il materiale tipo N forma la base del tipo PNP. Per lo stesso motivo, il materiale tipo N viene usato per le regioni di emettitore e di collettore nel transistore NPN, mentre il materiale tipo P viene impiegato per l'emettitore e il collettore nel transistore PNP.

Più importante, è il fatto che i due tipi sono precisamente l'opposto nel *funzionamento.* Ricordiamo che, nel caso del transistore NPN, quando *preleviamo* degli elettroni dalla base tipo P, gli elettroni possono scorrere dall'*emettitore al collettore* e proseguire nel circuito di lavoro. Per contro, nel PNP, se immettiamo degli elettroni *nella* base (regione N), gli elettroni scorrono dal *collettore all'emettitore* e proseguono nel circuito.

Questa differenza nel funzionamento diventa ancora più chiara quando confrontiamo i due simboli, che sono riportati in Figura 8.1.

E qui è meglio ragionare in base alla corrente *convenzionale*, piuttosto che alla corrente elettronica - infatti, nel resto del libro, faremo uso quasi esclusivamente della corrente convenzionale. Osservando per primo il simbolo NPN, vediamo che esso viene controllato da una piccola corrente, che viene pompata *nella* base, quando vengono *prelevati* degli *elettroni.* Il risultato è un grande flusso di elettroni *dal* collettore *all'*emettitore.

Osserviamo, ora , che la freccia è realmente una particolarità conveniente di questo simbolo. Essa serve da promemoria alla direzione, sia della corrente di controllo, che della corrente di lavoro. La freccia indica allontanamento dalla base e allontanamento dal collettore - ciò significa che la corrente convenzionale deve scorrere in entrata, alla base, e in entrata, al collettore, ma fuori dall'emettitore.

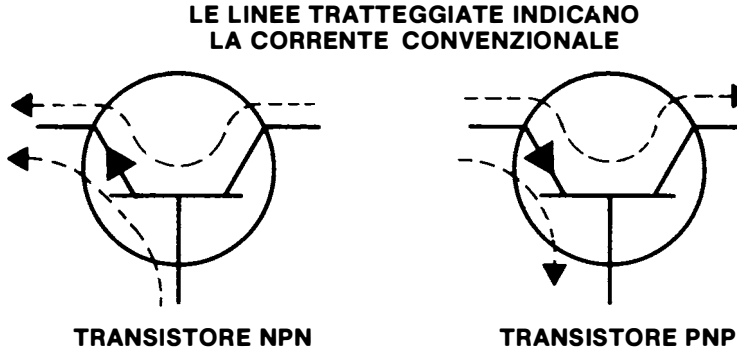


Figura 8.1

Quando una freccia appare in *qualsiasi* simbolo di semiconduttore, essa indica una giunzione PN ed è diretta da P a N. Ricordiamo che la regola per le giunzioni PN è che alla corrente convenzionale è *permesso* di passare da P a N, ma che essa viene *bloccata* quando tenta di passare nella direzione inversa, da N a P. Perciò, la corrente scorre fuori dall'emettitore di un transistore NPN.

Consideriamo, adesso, il simbolo del transistore PNP. La freccia nel simbolo dell'emettitore è *diretta* verso la base, anzichè via da essa. Ciò è giusto, perchè l'emettitore è del tipo P e la base è del tipo N e le frecce sono sempre dirette da P a N. In questo caso, ancora una volta, la freccia ci dice anche come scorre la corrente. In un transistore PNP, la corrente di controllo scorre *dall'*emettitore *alla* base, nella direzione della freccia. La corrente di lavoro scorre dall'emettitore al collettore.

Voi potete vedere perchè diciamo che i due tipi di transistori sono esattamente equivalenti ma di funzionamento opposto. Questo va un po' precisato, tuttavia, di regola, i transistori di tipo NPN possono funzionare più velocemente dei transistori PNP - essi possono andare in conduzione e all'interdizione più rapidamente. Inoltre il costo di fabbricazione dei transistori NPN, generalmente è minore. In conseguenza di questi due fatti, i transistori del tipo NPN sono più usati di quelli PNP.

In certe applicazioni, ognuno dei due tipi presenta dei ben definiti vantaggi rispetto all'altro. Così prima di esaminare come funzionano i transistori PNP, vediamo a che scopo vengono usati. A dispetto del fatto che i transistori PNP sono per lo più, leggermente più lenti e costosi dei transistori NPN, essi sono degli utili e importanti prodotti. Il nostro esempio farà vedere come il fatto che le caratteristiche di questi due transistori siano opposte possa venir sfruttato dal progettista di apparecchiature.

COME VENGONO USATI I TRANSISTORI PNP?

La Figura 8.2 rappresenta il sistema di altoparlante da noi già varie volte usato. Ma ora, lo abbiamo migliorato facendo uso di un transistore PNP.

Per vedere come l'aggiunta di un transistore PNP migliori il funzionamento,

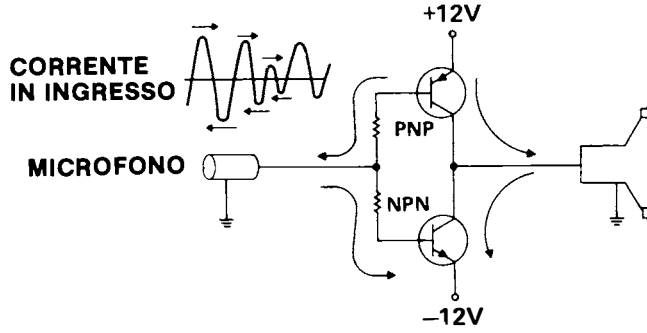


Figura 8.2

dobbiamo esaminare il funzionamento del nostro sistema originario a un solo transistore. Delle onde sonore colpiscono il microfono. In risposta, il microfono genera dei piccol rigurgiti di onde di corrente nel filo che va alla base del transistore. La corrente in questo filo scorre sempre *verso* la base, perchè sappiamo che la corrente convenzionale non può scorrere fuori dalla base di un transistore NPN - se no sarebbe diretta in senso contrario alla direzione della freccia sull'emettitore.

Ma ricordiamo che questa corrente continua non è costante; essa cresce - prima rapidamente e poi lentamente. Il transistore, naturalmente, amplifica questi piccoli aumenti, mediante la regolazione della corrente di alimentazione, producendo dei grandi aumenti che scorrono dal collettore all'emettitore. Questi grandi aumenti di corrente vanno all'altoparlante. Un aumento di corrente fa sobbalzare la membrana dell'altoparlante in un senso, creando un aumento di pressione nell'aria. Poi, quando la corrente diminuisce, la membrana *ricade,* rimbalzando in senso opposto. Ciò attira indietro l'aria, improvvisamante, generando un leggero vuoto, che segue l'onda di pressione. Così, l'altoparlante crea una versione amplificata del suono che colpisce il microfono.

COME PUO' ESSER D'AIUTO UN TRANSISTORE PNP?

Adesso, vediamo cosa non va in questa configurazione circuitale, così potremo capire come possa esser d'aiuto un transistore PNP. Il guaio è che, per fini indicativi, abbiamo usato, per il nostro amplificatore originario, una configurazione estremamente semplice. Per far funzionare a dovere un sistema di questo tipo, il nostro microfono e il nostro altoparlante dovrebbero avere delle capacità particolarissime. Occorrerebbero, cioè, dei dispositivi molto *fuori del comune*, funzionanti in base a degli aumenti di corrente continua - mentre i normali microfoni e altoparlanti

richiedono una corrente alternata. Come le onde sonore sono delle correnti alternate d'aria, così, un tipico microfono acustico risponde generando una corrente elettrica alternata, con la corrente prima *entrante* nell'amplificatore, poi *uscente* da esso. Analogamente, la maggior parte dei normali altoparlanti richiedono che la corrente vada prima in un senso, per spingere la membrana da una parte, e poi vada nell'altro senso, per *tirare* la membrana nell'altra parte.

Potremmo modificare la configurazione originaria del nostro amplificatore aggiungendo delle resistenze e dei condensatori. Ciò lo renderebbe un amplificatore in "classe A". Ma gli amplificatori in classe A sprecano un mucchio di potenza. Il chè li rende poco pratici come amplificatori di potenza.

L'amplificatore di Figura 8.2 è un amplificatore in "classe B". Gli amplificatori in classe B vengono anche chiamati amplificatori in "controfase" (push-pull), con riferimento al fatto che essi fanno uso di due transistori per dare una corrente di uscita alternata. Nel nostro amplificatore in classe B, abbiamo due transistori. Ora, un'onda di corrente che va a destra manda in conduzione il transistore NPN e un'onda che va a sinistra manda in conduzione il transistore PNP. Così, la corrente in uscita è una copia amplificata e invertita della corrente alternata nel microfono.

Un amplificatore in classe B così fatto, facente uso di un transistore NPN e di un transistore PNP (anzichè di due transistori dello stesso tipo) viene chiamato amplificatore in classe B *complementare,* perchè i due transistori sono fra loro complementari.

Si potrebbero usare, invece, due transistori NPN, ma il circuito pilota sarebbe molto più complicato e costoso. Con i transistori complementari, come nel nostro caso, per collegare i transistori al microfono, basterà una semplice coppia di resistenze. Queste resistenze servono a portare i transistori alla soglia di conduzione, senza tenerli in conduzione tutto il tempo.

Ci sono molti altri casi di questo genere, in cui la possibilità di impiegare sia dei transistori NPN che dei transistori PNP permette ai progettisti di realizzare delle configurazioni circuitali più semplici ed economiche, configurazioni che sprecano meno potenza e danno migliori prestazioni di quelle a un solo tipo di transistore.

COME FUNZIONA UN TRANSISTORE PNP?

La Figura 8.3 presenta lo schema di principio di un transistore PNP. Come nel tipo NPN, la regione di base del PNP è estremamente ristretta con uno spessore di solo poche decine di millesimi di pollice (meno di 100 micron) - ed è "drogata" debolmente. Poichè la base è un materiale di tipo N, troveremo in questa regione alcuni elettroni liberi. Nel disegno, gli elettroni liberi sono rappresentati da segni meno (-) e le lacune positive nella regione P sono rappresentate con dei cerchietti. Come vedremo, le *lacune* nel PNP compiono la stessa funzione degli elettroni liberi nell'NPN.

Così come abbiamo fatto con il transistore NPN, prendiamo quel brevissimo momento in cui cominciamo a far scorrere elettricità nel circuito di lavoro, senza fare assolutamente nulla alla regione di base. Cosa succede? Per una minima frazione di secondo, l'emettitore di tipo P emette delle lacune positive attraverso la base. Ciò avviene proprio nello stesso modo con cui degli *elettroni* liberi venivano emessi attraverso la base nel transitore NPN.

Poichè la base è stretta e "drogata" debolmente, un gran numero di lacune riesce ad attraversarla - una sola lacuna per un istante. Ciò perché, durante questo tempo, alcune delle lacune rimangono intrappolate nella regione di base, per aver incontrato gli elettroni liberi. Ogni lacuna positiva che rimane presa nella regione di base, per essere un elettrone caduto entro di essa, tenderà ad accrescere la carica positiva nella base. Finalmente, la carica positiva accumulata in questa regione N esercita abbastanza forza repellente da arrestare un'ulteriore migrazione di lacune. Una volta che nella regione N non possono più entrare delle lacune, la conduzione si arresta.

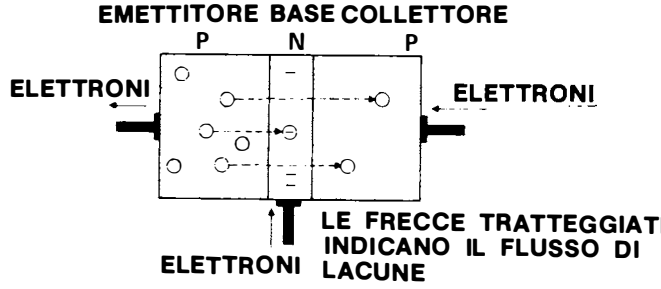


Figura 8.3

Per far riprendere la conduzione, il circuito di controllo deve ripristinare il diminuito rifornimento di elettroni liberi negativi, pompandone alcuni altri attraverso il terminale di base. Quando ciò accade, la presenza di nuovi elettroni liberi compensa la accresciuta carica positiva. Ciò fa diminuire la forza repellente e le lacune positive possono ricominciare a muoversi. Questo è tutto quello che c'è da dire su questo fenomeno - il funzionamento è molto simile a quello del transistore NPN, soltanto è esattamente l'opposto.

Potete fare ancora una domanda imbarazzante circa il comportamento del transistore PNP. Abbiamo parlato del movimento delle *lacune positive* che attraversano le giunzioni e scorrono attraverso tutte le tre regioni del dispositivo. Potete domandarvi: "Continuano le lacune a spostarsi lungo il *filo*, fornendo qualche specie insolita di elettricità?" Sarebbe una domanda logica, ma le lacune non possono far ciò; esse si spostano solo nel materiale *semiconduttore.* Vi è, in definitiva, solo una specie di elettricità: gli *elettroni* in moto. Se avete delle difficoltà a comprendere il PNP, ciò può esser dovuto al fatto che avete tanto sentito parlare delle lacune positive da aver dimenticato gli elettroni. "Le lacune si muovono" in un senso, è semplicemente un modo di dire per descrivere gli elettroni vincolati che si spostano nell'altro senso.

Con questa discussione del transistore PNP, abbiamo completato il nostro studio del funzionamento e delle applicazioni dei più importanti dispositivi della famiglia dei semiconduttori, i transistori NPN e PNP. Il nostro prossimo passo sarà di analizzare le loro caratteristiche specifiche nei data sheet, così come abbiamo studiato le caratteristiche dei diodi.

QUALI SONO LE SETTE CARATTERISTICHE FONDAMENTALI DEI TRANSISTORI?

Nello studio delle caratteristiche dei transistori, possiamo seguire un approccio più diretto di quello seguito per i diodi. Nel trattare dei diodi, abbiamo, per prima cosa, dovuto prendere in considerazione il comportamento dei diodi, analizzando il diagramma relativo alla corrente in funzione della tensione. Ma, nel caso dei transistori, abbiamo già esposto i punti essenziali del loro comportamento - noi già sappiamo come la corrente di *controllo* sia in grado di *commutare* e *regolare* la corrente di lavoro.

Un data sheet di transistore contiene una gran quantità d'informazioni. Ma l'informazione più importante può venir data attraverso sette caratteristiche principali. Le passeremo in rassegna, una alla volta:

Il **guadagno di corrente** h_{FE} o h_{fe} o beta) è, probabilmente, la più nota caratteristica dei transistori. Esso ci dice il numero di volte per cui il transistore *moltiplica* la corrente di controllo per produrre la corrente di lavoro. Per esempio, se un milliAmpere di corrente di controllo prelevato dalla base dà 100 milliAmpere di corrente di lavoro uscente dal collettore, il guadagno di corrente sarà di 100. Sono sinonimi di guadagno di corrente "beta" e "rapporto di trasferimento in corrente: si può scrivere in due modi diversi. Quando viene scritto "h_{fe}", esso è il guadagno di corrente per "segnali piccoli" ed è relativo alle onde. E' possibile che la corrente *totale* venga amplificata di una quantità diversa da quella di cui vengono amplificate le *onde* di corrente. E' per questo che potrete vedere sullo stesso data sheet sia un guadagno statico che un guadagno per segnali piccoli.

La **cifra di rumore** (NF, ossia "noise figure") è la seconda caratteristica fondamentale dei transistori. Rumore, in un circuito elettrico, è qualsiasi segnale *non voluto.* Questo rumore diventa udibile nei sistemi che producono suoni - i sibili e i crepiti disordinati che voi udite nella vostra radio o nel vostro giradischi sono rumore reso udibile. Ogni dispositivo elettrico produce in qualche misura del rumore; esso è causato da fluttuazioni casuali, non volute, di corrente e di tensione, che si verificano in conseguenza del fatto che gli elettrroni scorrono in modo turbolento e irregolare. La corrente in uscita da un transistore non è una replica perfettamente amplificata della corrente in entrata, ma è leggermente frastagliata. La cifra di rumore del transistore dà un'indicazione di *come* frastagliata e imperfetta sia la corrente di lavoro. Il rumore viene espresso in unità di *intensità sonora* relativa chiamata "decibel" (dB).

Le restanti cinque importanti caratteristiche dei transistori sono facili da capire, perchè sono sostanzialmente le stesse cinque caratteristiche dei diodi che abbiamo già studiato. In effetti, queste stesse cinque caratteristiche vengono specificate, con solo lievi modifiche, nei data sheet di quasi ogni dispositivo semiconduttore. Esse sono delle carattristiche per semiconduttore veramente *univerali.* Inoltre, esse valgono non solo per i semiconduttori, ma per tutti i dispositivi commutatori e regolatori - comprese le valvole nelle tubazioni idrauliche.

La Figura 8.4 elenca due caratteristiche dei transistori di cui abbiamo già parlato, nonchè le cinque caratteristiche universali.

1. GUADAGNO DI CORRENTE: hFE, hfe, "Beta" - GRADO DI AMPLIFICAZIONE DI CORRENTE

2. CIFRA DI RUMORE: NF - QUANTITA' DI CORRENTE CASUALE NON VOLUTA

CARATTERISTICHE UNIVERSALI	PER I DIODI	PER I TRANSISTORI		
		CIRCUITO DI LAVORO EMETTITORE-COLLETTORE	CIRCUITO DI COMANDO EMETTITORE - BASE	GIUNZIONE BASE-COLLETTORE
3. DISSIPAZIONE DI POTENZA MASSIMA ASSOLUTA	P - DISSIPAZIONE DI POTENZA IF - MASSIMA CORRENTE DIRETTA	DISSIPAZIONE IC - CORRENTE DI COLLETTORE	———	———
4. CONDUTTIVITA'	VF-TENSIONE DIRETTA	VCE (sat) - TENSIONE DI SATURAZIONE EMETTITORE COLLETTORE	VBE - TENSIONE BASE - EMETTITORE	———
5. CORRENTE DI DISPERSIONE	IR-CORRENTE INVERSA	ICEO - CORRENTE COLLETTORE EMETTITORE CON BASE APERTA	IEBO - CORRENTE FRA EMETTITORE E BASE CON COLLETTORE APERTO	ICBO - CORRENTE COLLETTORE BASE CON EMETTITORE APERTO
6. TENSIONE DI BREAKDOWN	VBR - TENSIONE DI BREAKDOWN	V(BR)CEO - TENSIONE DI BREAKDOWN COLLETTORE-EMETTITORE	V(BR)EBO - TENSIONE DI BREAKDOWN EMETTITORE - BASE	V(BR)CBO - TENSIONE DI BREAKDOWN COLLETTORE BASE
7. VELOCITA' DI FUNZIONAMENTO	trr-TEMPO DI RECUPERO INVERSO	TON - TEMPO DI ANDATA IN CONDUZIONE TOFF - TEMPO DI ANDATA ALL'INTERDIZIONE ft - FREQUENZA DI TRANSIZIONE C - CAPACITA'	———	———

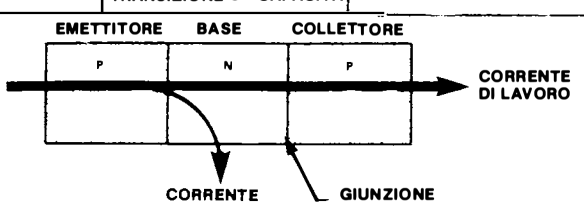


Figura 8.4

TYPES 2N3250, 2N3250A, 2N3251, 2N3251A
P-N-P EPITAXIAL PLANAR SILICON TRANSISTORS

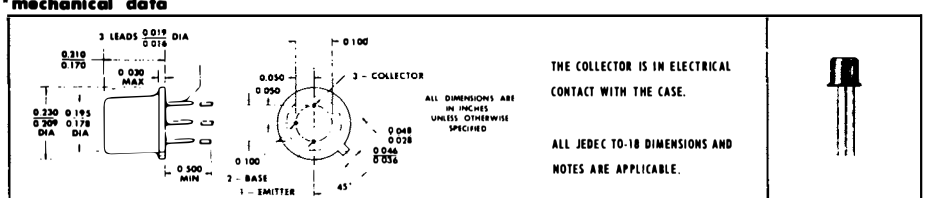
TYPES 2N3250, 2N3250A, 2N3251, 2N3251A
BULLETIN NO. DL-S 679459, MARCH 1967
REPLACES BULLETIN NO. DL-S 657970, AUGUST 1965

2

DESIGNED FOR LOW-POWER SATURATED-SWITCHING AND AMPLIFIER APPLICATIONS

- **Low-Level h_{FE}: 80 Min at 100 μA (2N3251 and 2N3251A)**
- **Made with TRI-REL† Redundant Stabilization (Field-Relief Electrode‡, Special Oxide Passivation, Annular Guard Ring§)**

***mechanical data**



***absolute maximum ratings at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)**

		2N3250 2N3251	2N3250A 2N3251A
6.	Collector-Base Voltage	−50 V	−60 V
	Collector-Emitter Voltage (See Note 1)	−40 V	−60 V
	Emitter-Base Voltage	−5 V	−5 V
3.	Continuous Collector Current	← −200 mA →	
	Continuous Device Dissipation at (or below) 25°C Free-Air Temperature (See Note 2)	← 0.36 W →	
	Continuous Device Dissipation at (or below) 25°C Case Temperature (See Note 3)	← 1.2 W →	
	Storage Temperature Range	−65°C to 200°C	
	Lead Temperature 1/16 Inch from Case for 60 Seconds	← 300°C →	

***electrical characteristics at 25°C free-air temperature**

Figura 8.5

	PARAMETER		TEST CONDITIONS		2N3250 MIN	2N3250 MAX	2N3250A MIN	2N3250A MAX	2N3251 MIN	2N3251 MAX	2N3251A MIN	2N3251A MAX	UNIT
6.	$V_{(BR)CBO}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = -10\ \mu A$, $I_E = 0$		−50		−60		−50		−60		V
6.	$V_{(BR)CEO}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage	$I_C = -10$ mA, $I_B = 0$, See Note 4		−40		−60		−40		−60		V
6.	$V_{(BR)EBO}$	Emitter-Base Breakdown Voltage	$I_E = -10\ \mu A$, $I_C = 0$		−5		−5		−5		−5		V
5.*	I_{CEV}	Collector Cutoff Current	$V_{CE} = -40$ V, $V_{BE} = 3$ V			−20		−20		−20		−20	nA
5.*	I_{BEV}	Base Cutoff Current	$V_{CE} = -40$ V, $V_{BE} = 3$ V			50		50		50		50	nA
1.	h_{FE}	Static Forward Current Transfer Ratio	$V_{CE} = -1$ V, $I_C = -0.1$ mA	See Note 4	40		40		80		80		
			$V_{CE} = -1$ V, $I_C = -1$ mA		45		45		90		90		
			$V_{CE} = -1$ V, $I_C = -10$ mA		50	150	50	150	100	300	100	300	
			$V_{CE} = -1$ V, $I_C = -50$ mA		15		15		30		30		
4.	V_{BE}	Base-Emitter Voltage	$I_B = -1$ mA, $I_C = -10$ mA	See Note 4	−0.6	−0.9	−0.6	−0.9	−0.6	−0.9	−0.6	−0.9	V
			$I_B = -5$ mA, $I_C = -50$ mA			−1.2		−1.2		−1.2		−1.2	V
4.	$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_B = -1$ mA, $I_C = -10$ mA			−0.25		−0.25		−0.25		−0.25	V
			$I_B = -5$ mA, $I_C = -50$ mA			−0.5		−0.5		−0.5		−0.5	V
1.	h_{ie}	Small-Signal Common-Emitter Input Impedance	$V_{CE} = -10$ V, $I_C = -1$ mA, f = 1 kHz		1	6	1	6	2	12	2	12	kΩ
1.	h_{fe}	Small-Signal Common-Emitter Forward Current Transfer Ratio			50	200	50	200	100	400	100	400	
	h_{re}	Small-Signal Common-Emitter Reverse Voltage Transfer Ratio				10×10^{-4}		10×10^{-4}		20×10^{-4}		20×10^{-4}	
	h_{oe}	Small-Signal Common-Emitter Output Admittance			4	40	4	40	10	60	10	60	μmho

NOTES: 1. These values apply between 0 and 200 mA collector current when the base-emitter diode is open-circuited.
2. Derate linearly to 200°C free-air temperature at the rate of 2.06 mW/deg.
3. Derate linearly to 200°C case temperature at the rate of 6.9 mW/deg.
4. These parameters must be measured using pulse techniques. $t_p = 300\ \mu s$, duty cycle $\leq 2\%$.

† Trademark of Texas Instruments
‡ Patent Pending
§ Patented by Texas Instruments
*Indicates JEDEC registered data

TEXAS INSTRUMENTS
INCORPORATED
POST OFFICE BOX 5012 • DALLAS, TEXAS 75222

2209

* I_{CEV} and I_{BEV} are simply a variation on I_{CEO} and I_{EBO}. Instead of having the third terminal open, it is connected to a constant voltage, which is specified in the test conditions.

Figura 8.6

TYPES 2N3250, 2N3250A, 2N3251, 2N3251A
P-N-P EPITAXIAL PLANAR SILICON TRANSISTORS

***electrical characteristics at 25°C free-air temperature (continued)**

	PARAMETER		TEST CONDITIONS	2N3250 2N3250A MIN	2N3250 2N3250A MAX	2N3251 2N3251A MIN	2N3251 2N3251A MAX	UNIT
1.	$\lvert h_{fe}\rvert$	Small-Signal Common-Emitter Forward Current Transfer Ratio	$V_{CE} = -20$ V, $I_C = -10$ mA, f = 100 MHz	2.5		3		
	f_T	Transition Frequency	$V_{CE} = -20$ V, $I_C = -10$ mA, See Note 5	250		300		MHz
7.	C_{obo}	Common-Base Open-Circuit Output Capacitance	$V_{CB} = -10$ V, $I_E = 0$, f = 100 kHz		6		6	pF
	C_{ibo}	Common-Base Open-Circuit Input Capacitance	$V_{EB} = -1$ V, $I_C = 0$, f = 100 kHz		8		8	pF
	$r_b'C_c$	Collector-Base Time Constant	$V_{CE} = -20$ V, $I_C = -10$ mA, f = 31.8 MHz		250		250	ps

NOTE 5. To obtain f_T, the $\lvert h_{fe}\rvert$ response with frequency is extrapolated at the rate of −6 dB per octave from f = 100 MHz to the frequency at which $\lvert h_{fe}\rvert = 1$

***operating characteristics at 25°C free-air temperature**

	PARAMETER		TEST CONDITIONS	2N3250 2N3250A MAX	2N3251 2N3251A MAX	UNIT
2.	NF	Spot Noise Figure	$V_{CE} = -5$ V, $I_C = -100\ \mu$A, $R_G = 1$ kΩ, f = 100 Hz	6	6	dB

***switching characteristics at 25°C free-air temperature**

	PARAMETER		TEST CONDITIONS†	2N3250 2N3250A MAX	2N3251 2N3251A MAX	UNIT
7.	t_d	Delay Time	$I_C = -10$ mA, $I_{B(1)} = -1$ mA, $V_{BE(off)} = 0.5$ V,	35	35	ns
	t_r	Rise Time	$R_L = 275\ \Omega$, See Figure 1	35	35	ns
	t_s	Storage Time	$I_C = -10$ mA, $I_{B(1)} = -1$ mA, $I_{B(2)} = 1$ mA,	175	200	ns
	t_f	Fall Time	$R_L = 275\ \Omega$, See Figure 2	50	50	ns

Figura 8.7

†Voltage and current values shown are nominal; exact values vary slightly with transistor parameters. Nominal base current for delay and rise times is calculated using the minimum value of V_{BE}. Nominal base currents for storage and fall times are calculated using the maximum value of V_{BE}.

*PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

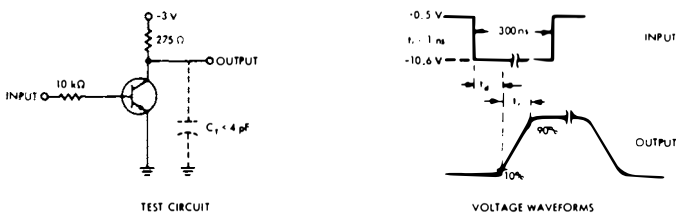


FIGURE 1—DELAY AND RISE TIMES

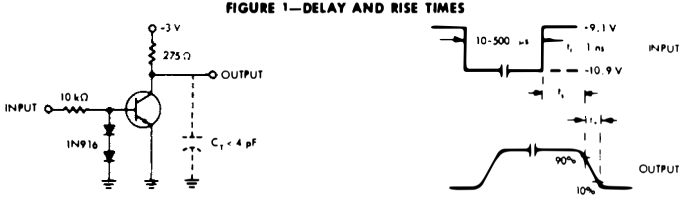


FIGURE 2 — STORAGE AND FALL TIMES

NOTES: a. The input waveforms are supplied by a generator with the following characteristics: $Z_{out} = 50\ \Omega$, duty cycle = 2%.

b. Waveforms are monitored on an oscilloscope with the following characteristics: $t_r \leq 1$ ns, $R_{in} \geq 100\ k\Omega$.

*Indicates JEDEC registered data

TEXAS INSTRUMENTS RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES AT ANY TIME IN ORDER TO IMPROVE DESIGN AND TO SUPPLY THE BEST PRODUCT POSSIBLE

Figura 8.8

Come si può vedere dalla tabella, ognuna delle cinque caratteristiche fondamentali appare nei data sheet in più di un modo; queste varianti sono indicate nei riquadri. Benchè non ci sia bisogno di tenere a memoria il significato di tutti questi simboli, dovrete imparare ad associare ogni caratteristica con il suo significato espresso da una delle cinque caratteristiche universali.

Discuteremo ognuna delle caratteristiche universali servendoci di un transistore PNP, piuttosto che di un NPN. I data sheet fanno uso della corrente *convenzionale* - usando un PNP è facile ricordare che la corrente convenzionale viene emessa dall'emettitore, raccolta dal collettore e prelevata dalla base. Tenete presente, tuttavia, che le caratteristiche di un NPN sono del tutto simili a quelle di un PNP, solo che la direzione delle correnti e delle tensioni è invertita. La direzione viene indicata dal *segno* del calore, un meno o un più. Per la corrente, la regola è "entrata positiva, uscita negativa". La corrente di collettore I_C, per esempio, è negativa per un PNP, perchè essa è *uscente" dal collettore - ma positiva per un NPN, perchè essa è entrante* nel collettore. Per la tensione, la regola è "positivo più alto, negativo più basso" e si applica alla *prima* delle due lettere segnate in calce al simbolo. Per esempio, con un PNP, la differenza di tensione collettore-emettitore V_{CE} è negativa, perchè la tensione del collettore (C è la prima lettera in calce) è più bassa della tensione di emettitore. Per contro, con un NPN, V_{CE} è positiva, perchè la tensione di collettore è più alta della tensione di emettitore.

Come indica la Figura 8.4, le caratteristiche universali si applicano a ciascuna delle tre diverse parti del transistore. Ciò, perchè vi sono tre diverse vie che la corrente prende attraverso il dispositivo: la corrente di lavoro dall'emettitore al collettore, la corrente di controllo dall'emettitore e fuori dalla base e la corrente che può scorrere - sotto certe condizioni - dalla base al collettore.

La **massima dissipazione di potenza** (misurata in Watt) è la potenza sprecata per conversione in calore. Il progettista vuol sapere quanto calore il transistore può sopportare prima di presentare disfunzioni o di bruciarsi. Ricordate l'I_F nei diodi? I_C è la caratteristica corrispondente per i transistori. Se la corrente di collettore supera questo limite, ne risulteranno delle temperature distruttivamente elevate (si noti che le ultime due colonne sono state lasciate in bianco, perchè questi valori sono trascurabili nei confronti del calore causato dalla grande corrente di lavoro, che è la corrente di collettore).

Le restanti quattro caratteristiche universali sono molto facili da ricordare, perchè esse possono essere illustrate dal funzionamento di un dispositivo commutatore e regolatore molto comune - un rubinetto.

La **conduttività** è un'indicazione di quanto facilmente la corrente scorre quando il dispositivo è portato in conduzione. Un grosso rubinetto ha una conduttività elevata - l'acqua scorre liberamente. Quanto più alta è la conduttività, tanto più bassa è la caduta di tensione diretta richiesta per far muovere una certa quantità di corrente. Nella prima colonna dei transistori, la conduttività del circuito di lavoro è specificata come "tensione di saturazione collettore-emettitore" $V_{CE(sat)}$, che è la differenza di tensione fra emettitore e collettore, richiesta per ottenere che una certa quantità di corrente si muove nel circuito *di lavoro,* quando il transistore viene portato completamente in conduzione (è "saturo"). Nella seconda colonna dei transistori, troviamo la tensione base- emettitore V_{BE}, che è semplicemente la tensione diretta del diodo formato da emettitore e base - questa è la conduttività del circuito di *controllo.* La terza colonna è in bianco perchè, tranne in casi rari, nessuno si preoc-

cupa di una tensione diretta ai capi della giunzione base-collettore, perchè questo diodo normalmente non presenta conduzione diretta.

La **corrente di dispersione** è una corrente non voluta, che scorre quando dovrebbe essere bloccata. Pensate a un rubinetto che sgocciola, anche se è chiuso. Nel transistore, ci preoccupiamo delle dispersioni in tutte le tre aree delle caratteristiche (la lettera "O" sta per "open circuit". Essa indica che il terzo terminale - quello che non è implicato nella misura - è disconesso. Per esempio, I_{CEO} vuol dire corrente collettore-emettitore con la *base* non connessa. Analogamente, I_{CBO} significa corrente collettore-base con l'emettitore non connesso).

La **tensione di breackdown** è la più alta tensione che il dispositivo può sopportare quando esso è all'interdizione. Se si supera questo limite, il dispositivo scarica e lascia passare una grande quantità di corrente. Pensate a un rubinetto che venga chiuso e che si rompa per eccessiva pressione. Una cosa facile da ricordare è che un transistore può scaricare dovunque in esso ci sia una possibilità di perdita - in pratica, ciò significa attraverso tutti e tre i cammini di corrente. Nella terza colonna, per esempio, $V_{(BR)CBO}$ indica la tensione di breackdown della giunzione base-collettore (quando l'emettitore è aperto).

La **velocità di funzionamento** indica la rapidità impiegata dal transistore per andare in conduzione e all'interdizione ("velocità di commutazione"), o passare da un livello della corrente di lavoro a un altro (velocità di "regolazione" o di "amplificazione").

Ritornando al rubinetto, questo è il tempo occorrente per ruotare la valvola avanti e indietro. Questa caratteristica è specificata nella prima colonna, perchè essa si applica alla velocità con cui la *corrente di lavoro* risponde a delle variazioni della corrente di controllo. Nel caso di transistori *commutatori*, parliamo del tempo occorrente per portare in conduzione il dispositivo, di solito fino al 90% della piena tensione; o per portarlo all'interdizione, di solito al 10% della piena tensione. Oppure parliamo di "tempo di salita"e di "tempo di caduta". In ogni caso, parliamo della velocità di funzionamento del dispositivo. Per contro, ai transistori *amplificatori* viene data una specifica della frequenza, anzichè dei tempi di commutazione. La più comune è la *frequenza di transizione* f_T. In sostanza, questa è la più alta frequenza alla quale il transistore può operare utilmente come amplificatore. In certi casi, non sono elencati nè i tempi di commutazione nè le frequenze. In tali casi *altre* specifiche indicheranno quanto bene il dispositivo lavori a frequenze che sono precisate nelle condizioni di collaudo.

Se siete dei lettori coscienziosi, a questo punto comincierete, probabilmente, a preoccuparvi; sarete tormentati dalla sensazione che non vi abbiamo detto tutto su come queste caratteristiche vengono misurate - o avrete l'impressione di non comprendere quanto vi abbiamo detto. Potrà farvi sentire più fiduciosi il sapere che ci sono più di *centocinquanta* specifiche standard per i semiconduttori e un mucchio di specifiche speciali - e che pochissimi ingegneri in attività professionale le conoscono tutte!

Fatevi coraggio - se vi siete formati una chiara idea delle cinque caratteristiche universali specificate per i semiconduttori che vi abbiamo mostrato, allora siete ben equipaggiati per afferrare il significato, più o meno di ogni specifica. Per fare un po' di pratica, abbiamo riprodotto un completo data sheet della serie 2N3250. Abbiamo riferito le specifiche più importanti contenute nel data sheet alla Figura 8.4, mediante dei numeri che vanno da 1 a 7 e delle graffe tracciate alla sinistra delle specifiche stesse.

Nel prossimo capitolo, spiegheremo due tipi di dispositivi relativamente semplici ma molto interessanti: i thyristori e i semiconduttori opto-elettronici. Se avete sentito parlare dei transistori a effetto di campo (FET) e vi chiedete perchè non li abbiamo ancora descritti, vi diremo che è perchè essi differiscono nel funzionamento dai transistori NPN e PNP e perchè il loro uso più importante si ha nei circuiti integrati.

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 8

1. La più importante caratteristica di funzionamento per cui un transistore del tipo PNP si distingue da un transistore del tipo NPN è:

☐ a. Che il PNP viene mandato in conduzione da una corrente convenzionale prelevata dalla base, mentre l'NPN viene mandato in conduzione da una corrente convenzionale immessa nella base.
☐ b. Niente. I due si comportano in modo identico sotto ogni aspetto.
☐ c. Che l'NPN commuta elettricità e il NPN regola elettricità.
☐ d. Che il PNP lavora meglio dell'NPN
☐ e. Come in c e d

2. Le frecce nei simboli dei semiconduttori rappresentano delle giunzioni PN e sono dirette da P a N nella direzione secondo la quale è permesso il passaggio della corrente convenzionale. Tenendo presente ciò, qual'è il simbolo del transistore PNP?

☐ a.

☐ b

☐ c.

☐ d.

☐ e.

3. Qual'è il vantaggio di usare un transistore NPN è un transistore PNP, invece di due transistori NPN, in un amplificatore in classe B (cioè in "controfase" - tipo in cui un transistore è in conduzione quando l'altro è all'interdizione)?

☐ a. Il PNP è più economico e funziona altrettanto bene
☐ b. Non c'è nessun vantaggio particolare. Un NPN può fare esattamente la stessa cosa che fa il PNP
☐ c. Il transistore PNP può regolare la corrente alternata che passa attraverso esso.
☐ d. L'ingresso può venir collegato molto semplicemente e direttamente a entrambe le basi dei transistori, perchè il PNP va in conduzione quando dalla base viene prelevata una corrente convenzionale, mentre l'NPN va in conduzione quando nella base viene pompata una corrente convenzionale.
☐ e. Nulla di tutto ciò

4. I transistori PNP sono meno usati di quelli del tipo NPN perchè:
- ☐ a. Sono stati inventati solo più di recente, per cui i progettisti hanno meno familiarità con essi
- ☐ b. Essi compiono una funzione completamente diversa da quella compiuta dai transistori NPN - una funzione che risulta considerevolmente meno utile.
- ☐ c. Essi sono generalmente più lenti, come velocità di funzionamento, di quelli del tipo NPN
- ☐ d. Essi sono generalmente più costosi da fabbricare di quelli del tipo NPN
- ☐ e. Come in c e d

5. Nel transistore PNP, la corrente di lavoro è costituita da:
- ☐ a. Elettroni liberi emessi dal collettore e raccolti dall'emettitore
- ☐ b. Lacune emesse dall'emettitore e raccolte dal collettore (alcune lacune rimangono "intrappolate" nella base per effetto della loro combinazione con degli elettroni liberi e, allo scopo di mantenere la conduzione, questa carica positiva deve essere neutralizzata fornendo degli elettroni al terminale di base)
- ☐ c. Lacune pompate nel terminale di base dal circuito di controllo
- ☐ d. Una combinazione di lacune e di elettroni liberi viaggianti nella stessa direzione.
- ☐ e. Come in a e c

6. L'h_{FE} o "beta" di un transistore è:
- ☐ a. La cifra di rumore
- ☐ b. Il guadagno di corrente
- ☐ c. Il rapporto fra la corrente del segnale uscente e la corrente del segnale entrante
- ☐ d. Il grado di amplificazione di corrente del transistore
- ☐ e. Tutto come sopra tranne "a"

7. Il significato del segno meno in certi valori delle specifiche contenute nei data sheet (come $V_{CE} = -1$ Volt e $I_C = -10$ milliAmpere) è il seguente:
- ☐ a. Questi valori corrispondono a delle correnti di elettroni, che sono negative
- ☐ b. Tutte le specifiche relative ai PNP sono negative, mentre tutte le specifiche relative ai NPN sono positive.
- ☐ c. Se la specifica è una corrente, come I_C, un valore negativo significa che la corrente scorre fuori dal particolare terminale al quale la misura è stata fatta - in questo caso il collettore
- ☐ d. Se la specifica è una tensione, come V_{CE}, il segnale meno (—) significa che la tensione al terminale indicato dalla prima lettera in calce (qui il collettore) è più bassa della tensione al terminale indicato dalla seconda lettera in calce (qui l'emettitore)
- ☐ e. Come in c e d (in altre parole, il segno indica la direzione: positiva entrante, negativa uscente - e positivo più alto, negativo più basso)

8. Alcune delle cinque caratteristiche universali di un transistore sono suddivise in specifiche distinte per:
- ☐ a. Il circuito di controllo (giunzione emettitore-base), il circuito di lavoro (percorso emettitore-collettore) e la giunzione base-collettore
- ☐ b. Commutazione e regolazione
- ☐ c. Informazione e lavoro
- ☐ d. Corrente e tensione

9. Quale delle cinque caratteristiche universali dei semiconduttori (sottoelencate) descrive la facilità con cui un dispositivo lascia passare la corrente (quanta differenza di tensione è richiesta per spostare una certa quantità di corrente)?

- ☐ a. Il valore massimo assoluto della potenza dissipata
- ☐ b. La conduttività
- ☐ c. La corrente di dispersione
- ☐ d. La tensione di breackdown
- ☐ e. La velocità di funzionamento

10. Se in un data sheet non sono dati nè i tempi di commutazione nè le frequenze massime, qual'è un'altra indicazione della velocità di funzionamento che viene di solito specificata?

- ☐ a. La cifra di rumore
- ☐ b. La conduttività
- ☐ c. Le frequenze di prova per la misura di altri parametri
- ☐ d. La corrente di collettore
- ☐ e. Nulla di tutto ciò

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 9

Thyristore Uno dei dispositivi di una classe di semiconduttori (costituito da almeno quattro strati P-N-P-N alternati), che scatta in uno stato di "conduzione" completa dalla corrente di lavoro alla ricezione di un impulso momentaneo di corrente di controllo e (tipicamente) può essere mandato all'interdizione interrompendo la corrente di lavoro in un altro punto qualsiasi del circuito. I thyristori sono per lo più dei dispositivi di potenza.

SCR Rettificatore controllato al silicio. Il suo nome ufficiale è "Thyristore a triodo a blocco inverso". E' un thyristore che può esser fatto scattare in conduzione *solo in una* direzione. I suoi terminali sono chiamati "anodo", "catodo" e "gate".

Triac Il suo nome ufficiale è "thyristore a triodo bidirezionale". E' un thyristore che può esser fatto scattare in conduzione nell'*una* o *nell'altra* direzione. I suoi terminali sono chiamati "terminale principale 2", "terminale principale 1" e "gate".

Controllo di Fase E' un metodo per regolare un'alimentazione in corrente alternata, mediante un dispositivo commutatore come un thyristore, variando, in ogni ciclo o semiciclo della c.a. il punto nel quale il dispositivo viene mandato in conduzione.

Fotodiodo E' un diodo semiconduttore PN, fatto in modo che la luce che cade su di esso faccia fortemente aumentare la corrente inversa di dispersione, così che il dispositivo possa commutare e regolare una corrente elettrica, in risposta ad una variazione dell'intensità luminosa.

Fototransistore E' un transistore la cui giunzione base-collettore funziona come un fotodiodo, in modo tale che la luce generi una corrente di base che faccia passare la corrente di lavoro nel transistore. Esso dà una corrente molto più forte di un semplice fotodiodo.

Diodo ad Emissione Luminosa (LED) E' un diodo semiconduttore PN fatto in modo tale da avere un'emissione di luce quando una corrente diretta viene immessa nel dispositivo.

CAPITOLO 9

THYRISTORI E OPTO-ELETTRONICA

Questo capitolo completa il nostro studio dei più importanti dispositivi semiconduttori discreti, presentando i thyristori e i semiconduttori opto-elettronici. Questi dispositivi sono derivati dalla tecnologia che sta alla base dei diodi e dei transistori e di cui abbiamo già trattato. Così, quando descriveremo questi dispositivi, troverete che la maggior parte dei concetti vi è già familiare e potrete mettere a profitto quasi tutto ciò che avete imparato sui diodi e sui transistori. Questo capitolo serve da dimostrazione grafica del fatto che, una volta acquisite le basi della teoria sui semiconduttori, le relative varianti ed applicazioni sono abbastanza facili da comprendere.

CHE COSA SONO I THYRISTORI?

I thyristori sono dei dispositivi commutatori che non richiedono alcuna corrente di comando una volta andati in conduzione. Tutto ciò che occorre per farli scattare è un rapido impulso di corrente di comando. Quando la corrente impulsiva si arresta, i thyristori seguitano a funzionare come se nulla fosse accaduto. Come potete immaginare, questo è un genere di *commutatore* molto utile.

Ci sono diverse specie di thyristori, ma noi discuteremo solo sui due tipi più importanti - i rettificatori controllati al silicio (SCR) e i triac. Come i transistori, questi dispositivi hanno due terminali per la corrente di lavoro e un terminale per la corrente di comando. Ma, contrariamente ai transistori, i thyristori non richiedono alcun'altra corrente di controllo una volta portati in conduzione. In conseguenza, i circuiti di comando sono assai semplici e consumano poca potenza. Questo è il principale vantaggio dei thyristori rispetto ai transistori.

I thyristori sono per lo più usati nello stadio "attivo" dei sistemi per controllare la potenza che va a un dispositivo di lavoro, come un motore. Come avrete sospettato, sono generalmente dei dispositivi di potenza - possono sostenere una gran quantità di potenza senza raggiungere delle temperature nocive. Benchè siano dei commutatori, i thyristori vengono raramente usati per elaborare informazioni nello stadio "decisionale" dei sistemi, perchè la loro velocità di funzionamento è, tipicamente, molto più bassa di quella dei transistori. Inoltre, non possono essere mandati all'interdizione per mezzo di una corrente di comando, per cui non possono venir controllati in modo continuativo, com'è il caso dei transistori. Ma ciò che fanno, lo fanno così bene che non c'è nulla che li possa sostituire.

CHE COSA E' UN SCR?

Un SCR, come indicato in Figura 9.1, è un dispositivo semiconduttore che normalmente blocca la corrente convenzionale che tenta di passare nell'uno o nell'altro

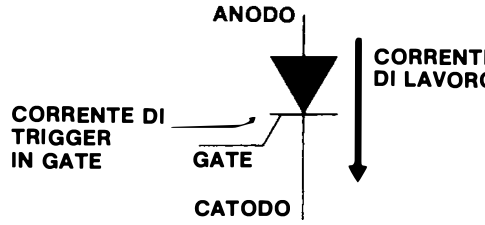


Figura 9.1

senso fra anodo e catodo. Ma quando la corrente tenta di scorrere, lo fa dall'anodo al catodo, un rapido impulso di corrente nel gate manda in conduzione l'SCR. E, più importante di tutto, l'SCR *rimane in conduzione*, anche dopo che la corrente nel gate è cessata, finché venga fornita corrente di lavoro. Se la corrente d lavoro viene interdetta in qualche altro punto del circuito di lavoro, occorre un altro impulso di gate per ripristinare la conduzione.

Poichè l'SCR normalmente non permette che alcuna corrente di lavoro apprezzabile passi in senso inverso, dal catodo all'anodo, esso funziona come qualsiasi altro diodo o raddrizzatore. Così esso è un *raddrizzatore* che può venir *controllato.* Di qui il nome "rettificatore controllato al silicio" o SCR. Il nome ufficiale è "thyristore a triodo a bloccaggio inverso, al silicio", ma, poichè esso sembra uno scioglilingua, il nome comunemente adattato è stato "SCR". (A questo punto è opportuno richiamare l'attenzione sul fatto che "diodo", abbiamo già visto, significa a *due* terminali, "trido" significa a tre, "tetrodo" significa a quattro e "pentodo" significa a cinque terminali. Questi terminali hanno lo stesso significato di quando sono applicati ai tubi a vuoto e le funzioni compiute dai tubi in molti casi sono simili alle funzioni compiute dai semiconduttori. Quasi tutti i transistori sono dei triodi, naturalmente, ma esistono anche alcuni transistori che sono dei tetrodi).

La Figura 9.2 fa vedere il principio di una tipica applicazione degli SCR e, precisamente, un sistema di accensione a stato solido per auto. Il circuito di alimentazione immagazzina una carica elettrica nel condensatore mentre l'SCR è interdetto. Quando arriva il momento in cui la candela deve produrre una scintilla, le puntine dello spinterogeno si chiudono per un momento permettendo che una piccola corrente di comando arrivi al gate. Questa corrente fa scattare l'SCR nello stato di "conduzione", scaricando la forte quantità di elettricità immagazzinata dal condensatore attraverso le poche *spire primarie* indicate nella parte più bassa della bobina. Questo repentino afflusso di altissima corrente genera un'alta tensione nelle spire secondarie della bobina e questa tensione produce la scintilla. Quasi subito, non appena la carica del condensatore si è esaurita, la corrente di lavoro attraverso l'SCR si arresta. Quando la corrente di lavoro cessa, l'SCR si interdisce, permettendo al condensatore di ricaricarsi.

Negli ordinari sistemi di accensione, le puntine dello spinterogeno devono commutare direttamente la piena corrente di lavoro. In coseguenza di ciò, le puntine si consumano rapidamente a causa delle alte tensioni e correnti che esse devono commutare - e ciò determina delle cattive prestazioni del motore. Il grande vantag-

gio dell'SCR in questa applicazione è che le puntine dello spinterogeno devono portare solo una bassissima tensione e una debolissima corrente. In conseguenza, esse durano quasi in eterno in buone condizioni e il circuito di lavoro può far uso di tensioni e di correnti più elevate, con il risultato di avere una scintilla più forte e quindi una miglior accensione.

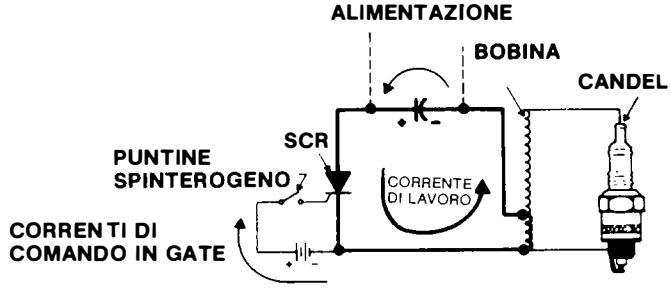


Figura 9.2

Vediamo un'altra tipica applicazione degli SCR. Abbiamo definito l'SCR un dispositivo commutatore. Ma, cosa abbastanza strana, esso può anche venire usato come dispositivo in corrente alternata. Questa è la base del suo impiego su larga scala negli attenuatori della luminosità delle lampade e nei controlli di velocità nei mescolatori di cibi, negli attrezzi di potenza, nei motori industriali e in molte altre funzioni di regolazione.

Un buon esempio è dato dal comando dei motori. La Figura 9.3 rappresenta un tipico impiego di SCR per rettificare e regolare la potenza fornita a un motore a corrente *continua* da una sorgente a corrente *alternata.* In questo sistema, il circuito di comando (trigger) manda in conduzione l'SCR una volta durante ogni completo ciclo in c.a. in un momento determinato dalla predisposizione normale della manopola di comando. Questo momento viene individuato dalla "fase", come si fa per una fase del ciclo lunare. In figura, si può vedere la forma dell'onda della corrente di lavoro, così come la sorgente in c.a. tenta di pomparla nel motore (linea tratteggiata) e quando l'SCR la lascia passare (linea continua), nel caso in cui il comando sia predisposto a *metà* potenza. Al punto A di ogni ciclo, la corrente cerca di passare in senso diretto (dall'anodo al catodo), ma viene bloccata, perchè l'SCR non è ancora in conduzione. Alla fase del ciclo indicata dal punto B, il circuito di trigger manda in conduzione l'SCR e la corrente scorre. Al punto C, la corrente diretta è diminuita fino ad assumere il valore zero, per cui l'SCR ritorna all'interdizione. Il momento in cui si ha l'impulso di trigger può venir variato, in modo da farlo capitare in corrispondenza ad ogni valore di fase del ciclo compreso fra i punti A e B, facendo in tal modo variare la corrente media fornita al motore per tutto il tratto che va da zero al valore massimo di ogni semionda.

Questo metodo di regolazione della potenza è chiamato "controllo di fase". Il suo pregio è che, praticamente, nessuna potenza viene sprecata (dissipata) per conversione in calore. Viene generato calore quando *regoliamo* la corrente, non quando la commutiamo. Quando riduciamo il passaggio della corrente mediante una resistenza o qualche specie di elemento di controllo di regolazione come un transistore o un reostato, le facciamo subire una caduta di tensione - e questo genera sempre del calore. Ma l'SCR è sempre completamente in conduzione o completamente indiretto e non riduce mai parzialmente il passaggio della corrente.

Adesso che sappiamo cosa fa e dove viene usato l'SCR vediamo come funziona.

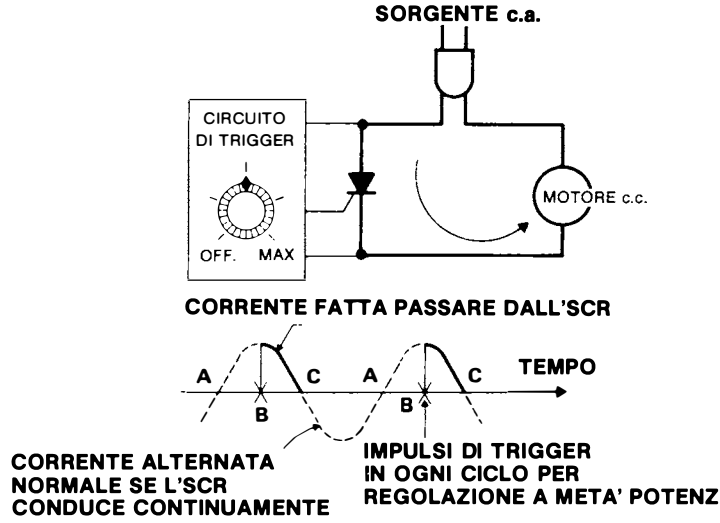


Figura 9.3

COME FUNZIONA UN SCR?

L'elemento semiconduttore di un SCR è una struttura PNPN a quattro strati, come indicato in Figura 9.4a. Ecco il principio di base a cui esso funziona:

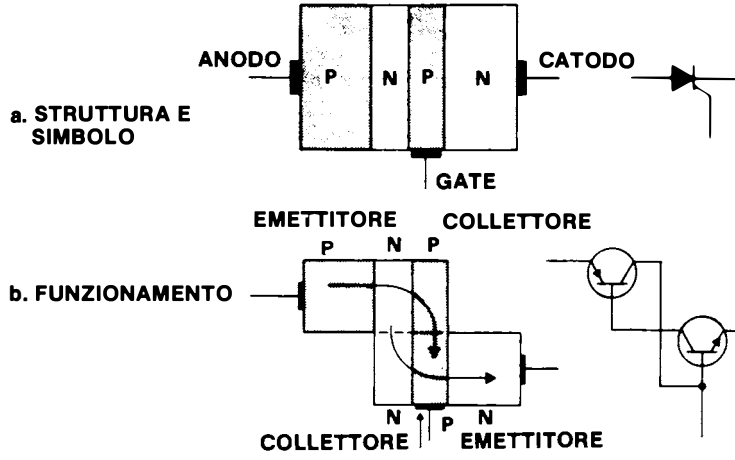


Figura 9.4

SERIES TIC106
P-N-P-N SILICON REVERSE-BLOCKING TRIODE THYRISTORS

absolute maximum ratings over operating case temperature range (unless otherwise noted)

	TIC106Y	TIC106F	TIC106A	TIC106B	TIC106C	TIC106D	UNIT
4. Repetitive Peak Off-State Voltage, V_{DRM} (See Note 1)	30	50	100	200	300	400	V
Repetitive Peak Reverse Voltage, V_{RRM}	30	50	100	200	300	400	V
1. Continuous On-State Current at (or below) 80°C Case Temperature (See Note 2)	5						A
Average On-State Current (180° Conduction Angle) at (or below) 80°C Case Temperature (See Note 3)	3.2						A
Surge On-State Current (See Note 4)	30						A
Peak Positive Gate Current (Pulse Width ≤ 300 μs)	0.2						A
Peak Gate Power Dissipation (Pulse Width ≤ 300 μs)	1.3						W
Average Gate Power Dissipation (See Note 5)	0.3						W
Operating Case Temperature Range	−40 to 110						°C
Storage Temperature Range	−40 to 125						°C
Lead Temperature 1/16 Inch from Case for 10 Seconds	230						°C

NOTES:
1. These values apply when the gate-cathode resistance R_{GK} = 1 kΩ.
2. These values apply for continuous d-c operation with resistive load. Above 80°C derate according to Figure 3.
3. This value may be applied continuously under single-phase 60-Hz half-sine-wave operation with resistive load. Above 80°C derate according to Figure 3.
4. This value applies for one 60-Hz half-sine-wave when the device is operating at (or below) rated values of peak reverse voltage and on-state current. Surge may be repeated after the device has returned to original thermal equilibrium.
5. This value applies for a maximum averaging time of 16.6 ms.

Figura 9.6

electrical characteristics at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

	PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
3.	I_{DRM}	Repetitive Peak Off-State Current	V_D = Rated V_{DRM},	R_{GK} = 1 kΩ, T_C = 110°C			400	μA
	I_{RRM}	Repetitive Peak Reverse Current	V_R = Rated V_{RRM},	I_G = 0, T_C = 110°C			1	mA
6.	I_{GT}	Gate Trigger Current	V_{AA} = 6 V,	R_L = 100 Ω, $t_{p(g)}$ ≥ 20 μs		60	200	μA
7.	V_{GT}	Gate Trigger Voltage	V_{AA} = 6 V, $t_{p(g)}$ ≥ 20 μs,	R_L = 100 Ω, R_{GK} = 1 kΩ, T_C = -40°C			1.2	V
			V_{AA} = 6 V, $t_{p(g)}$ ≥ 20 μs	R_L = 100 Ω, R_{GK} = 1 kΩ,	0.4	0.6	1	
			V_{AA} = 6 V, $t_{p(g)}$ ≥ 20 μs,	R_L = 100 Ω, R_{GK} = 1 kΩ, T_C = 110°C	0.2			
	I_H	Holding Current	V_{AA} = 6 V, T_C = −40°C	R_{GK} = 1 kΩ, Initiating I_T = 10 mA,			8	mA
			V_{AA} = 6 V,	R_{GK} = 1 kΩ, Initiating I_T = 10 mA			5	
2. →	V_{TM}	Peak On-State Voltage	I_{TM} = 5 A,	See Note 6			1.7	V
	dv/dt	Critical Rate of Rise of Off-State Voltage	V_D = Rated V_D,	R_{GK} = 1 kΩ, T_C = 110°C		10		V/μs

switching characteristics at 25°C case temperature

	PARAMETER		TEST CONDITIONS	TYP	UNIT
5.	t_{gt}	Gate-Controlled Turn-On-Time	V_{AA} = 30 V, R_L = 6 Ω, $R_{GK(eff)}$ = 5 kΩ, V_{in} = 50 V, See Figure 1	1.75	μs
	t_q	Circuit-Commutated Turn-Off Time	V_{AA} = 30 V, R_L = 6 Ω, I_{RM} ≈ 8 A, See Figure 2	7.7	μs

Figura 9.7

Osserviamo che se prendiamo solo le prime tre regioni del dispositivo a partire da sinistra, abbiamo l'equivalente di un transistore PNP, se prendiamo le prime tre regioni a partire da destra, abbiamo un transistore NPN. In Figura 9.4b si può vedere questa disposizione a "fratelli siamesi". Gli SCR non sono fatti in questo modo, ma è conveniente pensarli divisi in due elementi transistori. L'anodo è collegato all'estremo P del complesso, il catodo al lato N di esso e il gate all'altra regione P.

Supponiamo che la corrente cerchi di scorrere dall'anodo al catodo. Essa viene bloccata da entrambi i transistori. Ma se si pompa corrente nella base dell'NPN attraverso il terminale di gate, il transistore NPN va in conduzione - *e la sua corrente di lavoro* richiama *corrente di comando* della base del PNP, mandandolo in conduzione. Anche dopo che la corrente originaria di gate viene fatta cessare, perciò, la corrente di lavoro del PNP continua a scorrere direttamente nella base dell'NPN, mantenendolo in conduzione. In questo modo, continua a scorrere corrente fra anodo e catodo finchè essa non viene interrotta in qualche altro punto del circuito.

Come potrete immaginare, è possibile mandare all'interdizione l'SCR richiamando corrente dal gate - ma, nella maggior parte degli SCR, questo tipo di funzionamento non è molto efficiente. Alcuni thyristori sono stati progettati per un'efficiente interdizione dei gate - ma questi "commutatori controllati di gate" sono piuttosto rari.

QUALI CARATTERISTICHE SONO IMPORTANTI NEL DATA SHEET DI UN SCR?

Fra le molte caratteristiche specificate nei data sheet degli SCR, sono realmente importanti solo le cinque che si basano sulle caratteristiche *universali* dei semiconduttori, più due che valgono solo per i thyristori. Queste caratteristiche sono riassunte in Figura 9.5 mentre le Figure 9.6 e 9.7 presentano una pagina di data sheet di un SCR, con l'indicazione delle caratteristiche più importanti riferite alla Figura 9.5.

Per ricordarle meglio, passiamo in rassegna queste sette caratteristiche degli SCR:

La **dissipazione di potenza** in un SCR è l'equivalente della massima corrente diretta in un diodo. Tipicamente, nel caso dell'SCR, essa viene chiamata "corrente anodica diretta". Una tipica corrente diretta di SCR può avere il valore nominale di due Ampere. Ciò implica che la potenza dissipata farà aumentare la temperatura dell'SCR ad un livello pericolosamente elevato se la corrente diretta supera i due Ampere.

La **conduttività** di un SCR è semplicemente un modo per esprimere come facilmente il dispositivo conduce elettricità quando esso viene mandato completamente in conduzione, com'era il caso dei transistori. Probabilmente non troverete la parola "conduttività" in nessun data sheet, perchè con essa si intende descrivere solo il concetto. La conduttività di un SCR viene espressa dalla sua *tensione diretta* V_F. Un tipico data sheet la riporterà come una "tensione diretta statica" (dove "statica" significa con corrente continua permanente). Questa è la tensione diretta richiesta per ottenere un dato livello di corrente diretta, quando il dispositivo conduce. Per un SCR, questa grandezza massima aspecifica avrà sempre un valore situato in prossimità di 1,2 V di tensione diretta richiesta. Perchè 1,2 V? Riguardate lo schema dell'SCR in Figura 9.4. Ricordate che abbiamo due giunzioni PN dirette e che la caduta di tensione diretta per una giunzione PN al silicio è di circa 0,6 V. Due volte 0,6 V fa 1,2 V, tipica tensione diretta di un SCR.

La **corrente di dispersione** come ricorderete, è lo stillicidio di corrente che riesce a passare quando si suppone che il dispositivo la blocchi. Per un diodo, avevamo solo una dispersione *inversa* I_R. Ma, poichè l'SCR è un dispositivo di controllo, esso la bloccherà in *entrambe* le direzioni quando non è in conduzione. Così, nell'SCR, abbiamo *due* specifiche della dispersione: una è la "corrente *inversa* di blocco d'anodo", in cui "d'anodo" indica solo dove la corrente viene misurata. Si

SPECIFICHE "UNIVERSALI"	SPECIFICHE SCR	VALORI ESEMPLIFICATIVI
1 DISSIPAZIONE DI POTENZA	CORRENTE ANODICA DIRETTA	MASSIMA ASSOLUTA 2 A
2 CONDUTTIVITA'	VF TENSIONE DIRETTA	MASSIMA 1,2 V
3 CORRENTE DI DISPERSIONE	IR CORRENTE ANODICA DI BLOCCO INVERSA	MASSIMA 1 μA
	IF CORRENTE ANODICA DI BLOCCO DIRETTA	
4 TENSIONE DI BREAKDOWN	TENSIONE DI BLOCCO INVERSA	MASSIMA ASSOLUTA 100 V
	TENSIONE DI BLOCCO DIRETTA	
5 VELOCITA' DI FUNZIONAM.	Ton TEMPO DI ANDATA IN CONDUZIONE	TIPICA 1 μs
	Toff TEMPO DI COMMUTAZIONE ALL'INTERDIZIONE	TIPICA 2 μs
	IGT CORRENTE DI TRIGGER NEL GATE	MASSIMA 100 μA
	VGT TENSIONE DI TRIGGER AL GATE	MASSIMA 0,7 V

Figura 9.5

suppone, naturalmente, che la corrente inversa venga bloccata in ogni istante. La più frequente abbreviazione è I_R. L'altra è la corrente diretta di blocco d'anodo, per lo più abbreviata in I_F. La corrente tipica di dispersione è di 1 microAmpere. Fra le condizioni di prova relativa a questa specifica vi è una data tensione. Ciò significa che, a questa tensione, il dispositivo non lascerà passare più di 1 microampere.

La **tensione di breakdown** è la tensione alla quale viene meno la capacità di blocco e una gran quantità di corrente irrompe attraverso il dispositivo. Con gli SCR si usano i termini "massimo assoluto della tensione *diretta* in blocco" e "massimo assoluto della tensione *inversa* di blocco". Tipicamente, gli SCR possono sostenere 100 Volt, sia nell'una che nell'altra direzione, senza che si verifichi un breakdown.

La **velocità di funzionamento** di un SCR viene specificata per mezzo del "tempo di andata in conduzione" e del "tempo di commutazione all'interdizione". Il termine "commutazione" viene aggiunto per ricordare che il dispositivo non va all'interdizione per conto suo, ma viene mandato all'interdizione da un'interruzione dell'alimentazione. Velocità di commutazione tipiche sono di 1 e di 2 microsecondi.

Oltre a queste cinque caratteristiche universali, l'SCR ha altri due importanti parametri:

La **corrente di trigger del gate** I_{GT} specifica quanta *corrente* occorre per mandare in conduzione il dispositivo. Nel nostro tipico esempio, la specifica dice che occorrono *non più di* 100 microAmpere (alla tensione appropriata).

La **tensione di trigger del gate** V_{GT} specifica la "tensione" occorrente per far scattare il dispositivo - nel nostro caso, non più di 0,7 V. Prese insieme, queste due ultime specifiche dicono che 100 microampere a 0,7 V saranno sufficienti a far scattare il dispositivo.

Ora che comprendiamo il funzionamento dell'SCR, è facile comprendere il funzionamento dell'altro tipo di thyristore, il triac. La funzione del triac è identica a quella dell'SCR, solo che i triac possono venir fatti scattare in conduzione *sia nell'una che nell'altra* direzione.

IN CHE COSA UN TRIAC DIFFERISCE DA UN SCR?

Il triac si comporta in modo molto simile ad una coppia di SCR collegati al contrario. Il simbolo di un triac, rappresentato in Figura 9.8a, riflette questo fatto e la Figura 9.8b lo rende ancora più chiaro; l'SCR di sinistra, in questa figura, può condurre una corrente convenzionale diretta dall'alto in basso e l'SCR di destra può permettere il passaggio in direzione opposta.

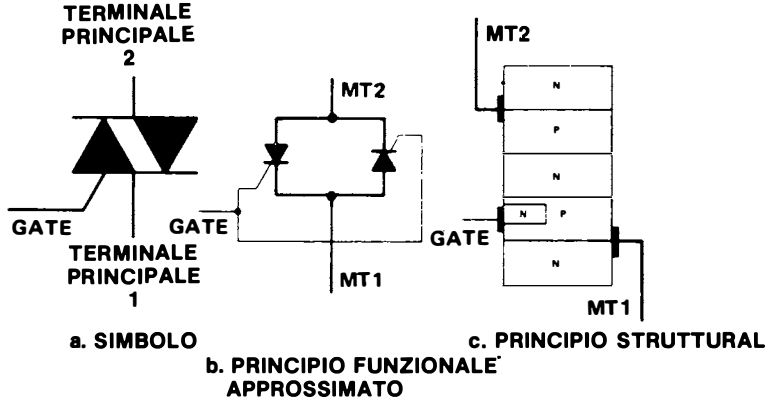


Figura 9.8

Si noti che il terminale di gate del triac è comune a *entrambi* gli SCR. Raffiguriamo il triac in un circuito a corrente alternata. Esso normalmente, blocca la corrente di lavoro che tenta di passare nell'*una o nell'altra* direzione fra i due terminali

TYPES TIC226B, TIC226D
SILICON BIDIRECTIONAL TRIODE THYRISTORS

absolute maximum ratings over operating case temperature range (unless otherwise noted)

			UNIT
Repetitive Peak Off-State Voltage, V_{DRM} (See Note 1)	TIC226B	±200	V
	TIC226D	±400	
Full-Cycle RMS On-State Current at (or below) 85°C Case Temperature, $I_{T(RMS)}$ (See Note 2)		8	A
Peak On-State Surge Current, Full-Sine-Wave, I_{TSM} (See Note 3)		±70	A
Peak On-State Surge Current, Half-Sine-Wave, I_{TSM} (See Note 4)		±80	A
Peak Gate Current, I_{GM}		±1	A
Peak Gate Power Dissipation, P_{GM}, at (or below) 85°C Case Temperature (Pulse Width ≤ 200 μs)		2.2	W
Average Gate Power Dissipation, $P_{G(av)}$, at (or below) 85°C Case Temperature (See Note 5)		0.9	W
Operating Case Temperature Range		−40 to 110	°C
Storage Temperature Range		−40 to 125	°C
Lead Temperature 1/16 Inch from Case for 10 Seconds		230	°C

NOTES. 1. These values apply bidirectionally for any value of resistance between the gate and Main Terminal 1.
2. This value applies for 50 Hz to 60 Hz full-sine wave operation with resistive load. Above 85°C derate according to Figure 2.
3. This value applies for one 60-Hz full sine wave when the device is operating at (or below) the rated value of on state current. Surge may be repeated after the device has returned to original thermal equilibrium. During the surge, gate control may be lost.
4. This value applies for one 60 Hz half sine wave when the device is operating at (or below) the rated value of on-state current. Surge may be repeated after the device has returned to original thermal equilibrium. During the surge, gate control may be lost.
5. This value applies for a maximum averaging time of 16.6 ms.

Figura 9.9

electrical characteristics at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

	PARAMETER		TEST CONDITIONS			MIN	TYP	MAX	UNIT
3.	I_{DRM}	Repetitive Peak Off-State Current	V_{DRM} = Rated V_{DRM},	$I_G = 0$	$T_C = 110°C$			±2	mA
6.	I_{GTM}	Peak Gate Trigger Current	$V_{supply} = +12$ V†,	$R_L = 10\ \Omega$,	$t_{p(g)} \geq 20\ \mu s$		15	50	mA
			$V_{supply} = +12$ V†,	$R_L = 10\ \Omega$,	$t_{p(g)} \geq 20\ \mu s$		−25	−50	
			$V_{supply} = -12$ V†,	$R_L = 10\ \Omega$,	$t_{p(g)} \geq 20\ \mu s$		−30	−50	
			$V_{supply} = -12$ V†,	$R_L = 10\ \Omega$,	$t_{p(g)} \geq 20\ \mu s$		75		
7.	V_{GTM}	Peak Gate Trigger Voltage	$V_{supply} = +12$ V†,	$R_L = 10\ \Omega$,	$t_{p(g)} \geq 20\ \mu s$		0.9	2.5	V
			$V_{supply} = +12$ V†,	$R_L = 10\ \Omega$,	$t_{p(g)} \geq 20\ \mu s$		−1.2	−2.5	
			$V_{supply} = -12$ V†,	$R_L = 10\ \Omega$,	$t_{p(g)} \geq 20\ \mu s$		−1.2	−2.5	
			$V_{supply} = -12$ V†,	$R_L = 10\ \Omega$,	$t_{p(g)} \geq 20\ \mu s$		1.2		
2.	V_{TM}	Peak On-State Voltage	$I_{TM} = \pm 12$ A,	$I_G = 100$ mA,	See Note 6			±2.1	V
	I_H	Holding Current	$V_{supply} = +12$ V†,	$I_G = 0$,	Initiating $I_{TM} = 500$ mA		20	60	mA
			$V_{supply} = -12$ V†,	$I_G = 0$,	Initiating $I_{TM} = -500$ mA		−30	−60	
	I_L	Latching Current	$V_{supply} = +12$ V†,	See Note 7			30	70	mA
			$V_{supply} = -12$ V†,	See Note 7			−40	−70	
	dv/dt	Critical Rate of Rise of Off-State Voltage	V_{DRM} = Rated V_{DRM},	$I_G = 0$,	$T_C = 110°C$		500		V/μs
	dv/dt	Critical Rate of Rise of Commutation Voltage	V_{DRM} = Rated V_{DRM}, See Figure 3	$I_{TRM} = \pm 12$ A,	$T_C = 85°C$,	5			V/μs

† The supply voltage is called positive when it causes Main Terminal 2 to be positive with respect to Main Terminal 1.

NOTES: 6. This parameter must be measured using pulse techniques. $t_w \leq 1$ ms, duty cycle ≤ 2%. Voltage-sensing contacts, separate from the current-carrying contacts, are located within 0.125 inch from the device body.

7. The triacs are triggered by a 15-V (open-circuit amplitude) pulse supplied by a generator with the following characteristics: $R_G = 100\ \Omega$, $t_w = 20\ \mu s$, $t_r \leq 15$ ns, $t_f \leq 15$ ns, f = 1 kHz.

Figura 9.10

principali, ma può esser *fatto scattare* in conduzione in entrambe le direzioni da un impulso momentaneo applicato al gate. Ciò si riflette nel nome ufficiale del triac, che è "thyristore a triodo bidirezione".

L'elemento semiconduttore del triac ha *cinque* strati e una piccola *sesta regione* sotto una parte del controllo di gate, come indicato in Figura 9.8c. Questa disposizione del gate permette di far scattare il triac per mezzo di una corrente di gate diretta nell'*uno o nell'altro* senso - non solo *in ingresso* al gate come nell'SCR.

Ricorderete che l'SCR era sostanzialmente costituito da due transistori connessi fianco a fianco. Il triac è l'equivalente di due SCR affiancati. Si noti che i terminali del triac non sono chiamati "anodo" e "catodo" ma "terminale principale uno" e "terminale principale due". Poichè il funzionamento del triac è così simile a quello dell'SCR, le specifiche per i due sono praticamente identiche. Le Figure 9.9 e 9.10 riproducono le principali specifiche prese dal data sheet di un triac; queste specifiche sono riferite ai numeri delle specifiche dell'SCR riportate in Figura 9.5.

QUALE E' UNA COMUNE APPLICAZIONE DEL TRIAC?

Noterete che il circuito di Figura 9.11 è, sostanzialmente, lo stesso che abbiamo usato per spiegare il funzionamento dell'SCR.

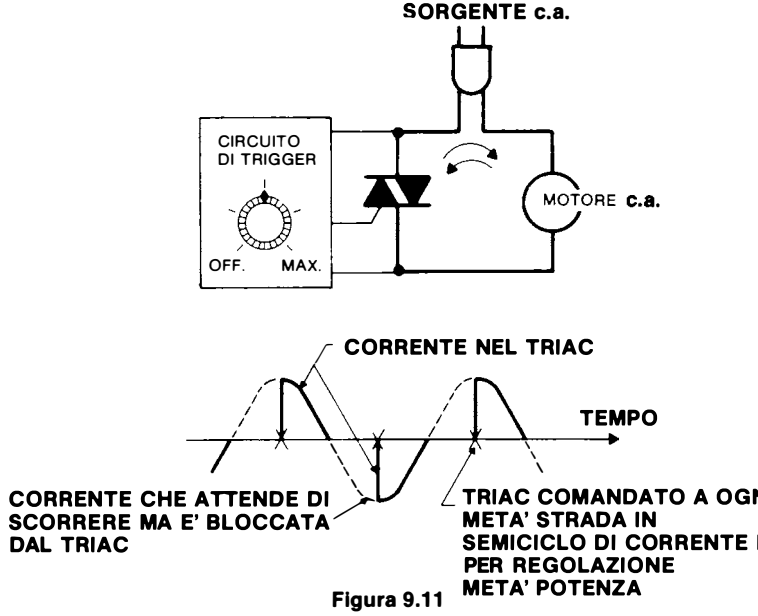


Figura 9.11

Ma adesso benché si faccia ancora uso di un'alimentazione in c.a. impieghiamo un motore in c.a.

La curva tratteggiata sulla forma d'onda rappresenta la corrente alternata del triac. Questa è anche la corrente entrante nel motore quando il circuito di trigger è

predisposto a *piena* velocità - il triac viene fatto scattare all'*inizio* di ogni onda, sia essa una semionda diretta o una semionda inversa.

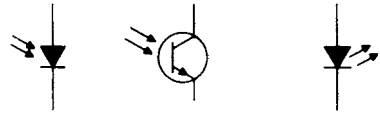
Ma se mettiamo la manopola a *metà* velocità, il circuito di comando ritarda il trigger del triac fino alla *metà* di ogni semionda, come indicato dalle curve continue. La forma d'onda risultante è ancora una corrente alternata, ma, poichè in ognuno dei due sensi passa, in media, meno corrente, il motore rallenta. Così, il triac può *regolare* una corrente alternata per mezzo di una *commutazione*. Questa tecnica viene chiamata "controllo di fase".

Detto questo sui thyristori, diamo un'occhiata a certi semiconduttori che si interfacciano con il mondo esterno: i dispositivi opto-elettronici.

COSA SONO I SEMICONDUTTORI OPTO-ELETTRONICI?

I dispositivi semiconduttori opto-elettronici sono semplicemente dei diodi e dei transistori fatti in modo da interagire in misura utile con la *luce*. Tutti i diodi e i transistori interagiscono fino ad un certo grado con la luce - una delle funzioni delle loro custodie è quella di impedire il passaggio della luce - ma i dispositivi opto-elettronici sono stati studiati in modo da fare *buon uso* di questo fenomeno.

Esistono due importanti categorie di dispositivi opto-elettronici: i *sensori di luce* sono dei diodi e dei transistori che convertono la luce in corrente elettrica. Gli *emettitori di luce* sono dei diodi che convertono la potenza elettrica in luce (esattamente l'inverso). La Figura 9.12 indica i simboli di questi dispositivi; il fotodiodo e il fototransistore sono dei sensori e il diodo a emissione luminosa (o LED) è un



FOTODIODO **DIODO A EMISSIONE DI LUCE (LED)**

FOTOTRANSISTORE NPN

Figura 9.12

emettitore di luce. Il simbolo del fototransistore è esattamente uguale al simbolo di un comune transistore, senza il terminale di base e in cui le frecce indicano la luce che colpisce la base.

Tutti i dispositivi opto-elettronici si basano su un semplice principio: ogniqualvolta la luce colpisce il materiale semiconduttore, essa tende a sbalzar via gli elettroni vincolati dai loro ricettacoli, per così dire, generando degli elettroni liberi e delle lacune. Reciprocamente, quando un elettrone cade *entro* una lacuna, esso tende a generare una particella di luce (un "fotone").

Voi sapete cosa succede quando degli elettroni liberi e delle lacune cominciano a girovagare intorno alla giunzione di un transistore o di un diodo. La Figura 9.13 mostra un fotodiodo usato per controllare un piccolissimo motore a corrente continua. L'intento è di azionare il motore solo quando la luce colpisce il fotodiodo - allora, quanto più forte è la luce, tanto più veloce è il motore. Il fotodiodo è molto simile a

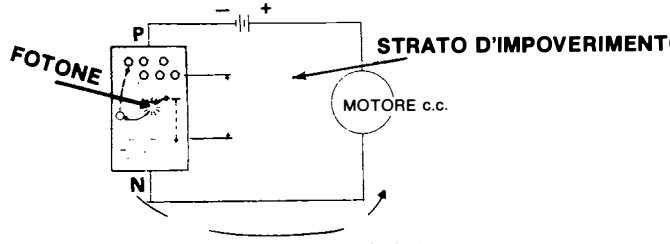
un diodo ordinario, solo che esso ha una finestra o una lente che lascia cadere la luce sulla giunzione PN. Nel nostro circuito, la batteria tenta di pompare elettroni da P a N attraverso il diodo. Ma questa è la direzione inversa per gli elettroni. Come ricorderete dal nostro capitolo sui diodi, gli elettroni liberi e le lacune vengono spinti in senso opposto, lasciando uno strato di impoverimento, svuotato di lacune e di elettroni liberi, intorno alla giunzione. L'unica corrente che scorre è la corrente di dispersione, che è trascurabile.

Supponiamo ora che un fotone di luce colpisca l'elemento semiconduttore, entro l'area dello strato d'impoverimento. Vengono allora generati, nello strato di impoverimento, un elettrone libero e una lacuna (ciò presuppone che il diodo sia stato progettato in modo appropriato, faccia uso del tipo giusto di materiale semiconduttore - di solito silicio - possieda un sufficiente "drogaggio" delle impurità giuste ed abbia un chip opportunamente conformato e posizionato per ricevere la luce, etc.). Immediatamente, l'elettrone libero viene costretto dalla batteria ad entrare nella regione N e ad uscire dal terminale catodico, mentre la lacuna viene spinta nella direzione opposta. L'effetto risultante è che un elettrone passa da P a N attraverso il circuito ed il motore.

Moltiplichiamo questa sequenza per gli innumerevoli milioni di fotoni contenuti in un forte raggio di luce e otterremo una considerevole corrente per azionare il minuscolo motore. Così, la funzione di un fotodiodo è quella di commutare e regolare una corrente di lavoro sotto il *controllo* della luce che colpisce il dispositivo.

L'effetto da ricordare è che la luce che colpisce la giunzione di un semiconduttore fa grandemente aumentare la corrente inversa di *dispersione*. Ciò vale per tutti i dispositivi semiconduttori. I sensori di luce sono semplicemente dei diodi e dei transistori in cui questo effetto viene esaltato ed efficacemente utilizzato.

Nel caso dei fotodiodi, c'è una precisazione da fare sulla regola che la luce fa aumentare la corrente di dispersione. E' vero che la luce che cade su una giunzione PN tende sempre a far scorrere gli elettroni nella direzione inversa, da P a N. Ma, sta di fatto, che non occorre sempre un'alimentazione esterna per far scorrere corrente. Nel circuito di Figura 9.13, se togliamo la batteria, in modo che il circuito sia



UN ELETTRONE FLUISCE AL MOTORE
PER OGNI FOTONE CHE COLPISCE
Figura 9.13

costituito solo dal fotodiodo e dal motore, quando la luce colpisce il fotodiodo, scorre una piccola quantità di corrente - generata interamente dalla luce.

Più semplicemente, ogni fotodiodo è teoricamente capace di convertire energia luminosa in energia elettrica. Le celle solari nei satelliti artificiali e i sensori in molti esposimetri sono semplicemente dei fotodiodi costruiti in modo particolare per esaltare questa capacità di generare corrente elettrica. Quando i fotodiodi ven-

gono usati insieme con un alimentatore distinto (come in Figura 9.13), essi vengono chiamati "fotoconduttori", volendo dire con ciò che essi *conducono* corrente quando sono illuminati e *bloccano* corrente quando sono in oscurità. Ma i fotodiodi usati per *generare* corrente senza l'assistenza di un altro alimentatore sono chiamati "fotovoltaici" - perché essi, realmente, producono una tensione nella direzione inversa.

COSA FANNO I FOTOTRANSISTORI CHE I FOTODIODI NON FANNO?

Il fototransistore, come la maggior parte dei fotodiodi, è un dispositivo "fotoconduttore". La Figura 9.14 rappresenta un NPN (naturalmente è possibile anche una

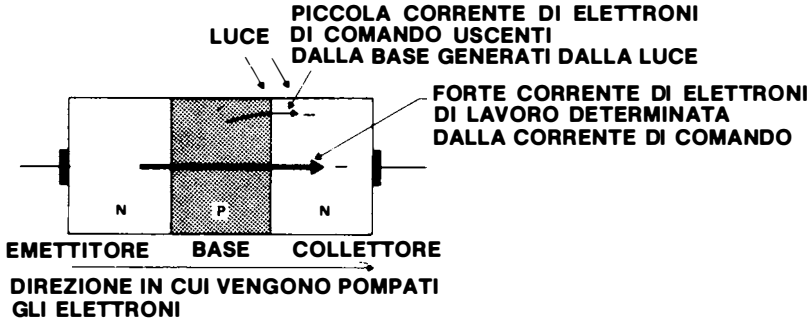


Figura 9.14

versione PNP). Potremo sostituire il fotodiodo nel circuito di Figura 9.13 con questo fototransistore. Anch'esso funziona commutando e regolando corrente quando l'alimentatore tenta di pompare elettroni dall'emettitore al collettore. Quando non c'è luce, non scorre corrente, perché non c'è corrente di *controllo* in base. Ma, quando la luce colpisce la giunzione base-collettore, scorre una corrente inversa di dispersione. Questa, in effetti, costituisce una corrente di elettroni che viene richiamata dalla base - proprio quello che ci occorre per mandare in conduzione un transistore NPN. Ma, nel fototransistore, contrariamente a quanto avviene nel diodo, dall'emettitore al collettore scorre una corrente di lavoro molto *maggiore*. Così, il fototransistore funziona come il fotodiodo, ma, in più, amplifica la minuscola corrente prodotta dalla luce. Ricordate che con il diodo, otteniamo solo *un* elettrone di corrente per ogni elettrone che lascia la regione P. Con il fototransistore, invece, per ogni elettrone che lascia la regione P circa *cento* elettroni passano dall'emettitore al collettore e attraverso il circuito di lavoro.

COME FUNZIONANO GLI EMETTITORI DI LUCE?

I diodi emettitori di luce invertono semplicemente l'effetto utilizzato nei sensori di luce. Quando un elettrone libero in un pezzo di materiale semiconduttore incontra una lacuna e vi cade dentro, il processo genera un fotone di luce. Il fotone viene lanciato via in qualche direzione a caso. Innumerevoli fotoni fuggenti insieme costituiscono un raggio di luce.

In Figura 9.15 si può vedere come questo effetto venga usato nei diodi a emissione luminosa per produrre una quantità di luce utilizzabile, cosicchè un LED serve

come una specie di lampadina a semiconduttore. Il LED viene inserito in un circuito con un alimentatore che pompa attraverso esso una corrente diretta. Gli elettroni iniettati nel chip al catodo attraversano la regione N come elettroni liberi, mentre le

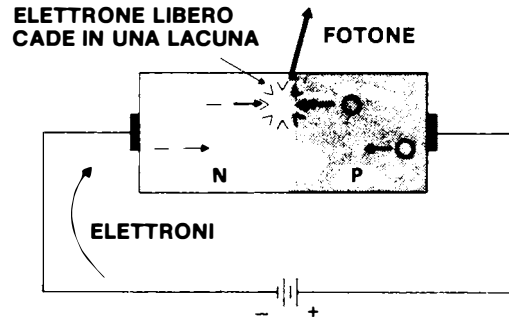


Figura 9.15

lacune generate all'anodo dalla sottrazione di elettroni vincolati attraversano la regione P. In prossimità della giunzione PN, gli elettroni liberi cadono entro delle lacune, generando dei fotoni di luce nel processo. Se la corrente diretta è sufficiente, l'area di giunzione del chip risplende luminosamente.

I diodi a emissione luminosa non sono fatti di silicio o di germanio. Queste due sostanze, anche se molto indicate per *sentire* la luce, hanno un rendimento troppo basso per dare dei buoni *emettitori* di luce. Esse emettono più calore che luce. Così invece, si usa come sostanza semiconduttrice un composto di elementi. Il più usato è l'arseniuro di gallio. Il gallio è un'impurità di tipo P e l'arseniuro è un'impurità di tipo N. Combinati in quantità precisamente uguali, essi compensano esattamente il reciproco effetto di drogaggio e forniscono una struttura molto simile al silicio puro. L'arseniuro di gallio, nella sua forma *pura*, ha un numero piccolo di lacune positive e di elettroni liberi. Ma proprio com'è il caso quando si fa uso di silicio, l'arseniuro di gallio dev'essere *"drogato"* per produrre del materiale di tipo P in una delle due aree del chip e del materiale di tipo N nell'altra.

QUALI COLORI DI LUCE SONO INTERESSATI NELLA OPTO-ELETTRONICA?

I LED tipici producono luce *infrarossa,* una gamma di colori invisibili all'occhio umano. Ma, come si è visto, la maggior parte dei *sensori* di luce a semiconduttori ha la massima sensibilità proprio in questa gamma dello spettro luminoso. Il risultato è che questi dispositivi a infrarossi si prestano a delle utili e interessanti applicazioni, come gli allarmi antifurto ed i sistemi di sorveglianza notturna per uso militare.

Esistono, tuttavia, molti sensori ed emettitori di luce che sentono e generano luce *visibile* - di solito luce rossa o verde. I diodi emettitori di luce visibile (VLED) sono già largamente usati per indicare delle cifre nelle calcolatrici da tavolo e in altri strumenti. Ricorderete che li abbiamo usati come elementi visualizzatori nel nostro baby computer.

IN QUALI ALTRI MODI VENGONO USATI I DISPOSITIVI OPTO-ELETTRONICI?

L'uso forse più comune degli emettitori e dei sensori di luce opto-elettronici si ha nella lettura delle schede perforate e del nastro di carta perforata. La ben nota scheda Hollerith, del tipo comunemente usato per fatturare i singoli addebiti ai clienti, è tuttora un supporto molto diffuso per immettere i dati nei calcolatori.

La Figura 9.16 permette di comprendere il funzionamento di un lettore opto-elettronico di schede perforate. Ogni foro nella scheda perforata rappresenta un bit di dati (un "dato"). La scheda viene fatta passare fra una schiera di emettitori di luce, da un

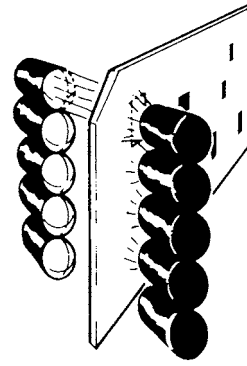


Figura 9.16

lato, e una schiera di sensori di luce, dall'altro. Ogni emettitore genera continuamente luce, ma ogni sensore viene azionato solo quando un foro gli passa davanti e permette l'arrivo ad esso della luce. In questo modo, ogni foro trasmette luce al sensore e genera un impulso di elettricità; questo impulso viene opportunamente interpretato dal calcolatore e usato come dato in ingresso. Questa tecnica opto-elettronica dà molto più affidamento del vecchio metodo a contatti, perchè, con i soli raggi luminosi facenti contatto con la scheda, non ci sono parti in moto soggette a usura o capaci di incepparsi.

Questo principio di interrompere un raggio di luce fra un emettitore e un sensore, sta anche alla base, naturalmente, di molti sistemi antifurto e rivelatori della presenza di estranei. In queste applicazioni viene sfruttata la capacità dell'opto-elettronica a stato solido di funzionare così bene con la luce infrarossa. In tali sistemi, l'intruso non sa che la sua presenza è stata rivelata.

Man mano che i miglioramenti dei processi riducono i prezzi dei dispositivi opto-elettronici, questi trovano un numero sempre maggiore di impieghi nell'industria - per il conto degli oggetti portati da un nastro trasportatore, in quanto gli oggetti interrompono il pannello luminoso, nelle operazioni di ispezione, nelle misure, nel controllo di flussi, nel controllo del peso, negli indicatori di livello e in molte altre applicazioni.

Ancora un'altra applicazione dei sensori di luce a stato solido si ha nel tubo Tivicon TM, un tubo per la ripresa delle immagini fatto dalla Texas Instruments per le

telecomunicazioni. Questo tubo è estremamente sensibile anche a dei soggetti debolmente illuminati ed è capace di vedere la luce infrarossa. Nel tubo Tivicon, la luce cade su una schiera di, grosso modo, un milione di minuscoli fotodiodi, che sono stati ottenuti da un unico wafer di silicio del diametro di meno di un pollice.

QUALI CARATTERISTICHE VENGONO SPECIFICATE NEI DATA SHEET DEI DISPOSITIVI OPTO-ELETTRONICI?

Molte delle specifiche applicate ai dispositivi opto-elettronici sono uguali a quelle che già avete conosciuto in seguito alla trattazione dei normali diodi e transistori - per cui non occorre ripeterle. Ma, come potrete prevedere, i dispositivi opto-elettronici richiedono alcune specifiche aggiuntive aventi a che fare con la luce.

Per i **sensori di luce:**

La **corrente in illuminazione** I_L è la quantità di corrente che scorre (in certe condizioni di tensione) nelle condizioni corrispondenti ad una certa quantità precisata di *luce.*

La **corrente in oscurità** I_D è la quantità di corrente che scorre (in certe condizioni di tensione) in condizioni di *oscurità.*

Per gli **emettitori di luce:**

La **potenza radiante resa** P_O è la quantità di potenza luminosa (luminosità), che il diodo produce, date certe condizioni di prova di corrente diretta. Una specifica abbastanza tipica è di un milliwatt di potenza radiante.

La **lunghezza d'onda all'emissione di picco** λ picco specifica il colore più luminoso emesso. La "y" capovolta è la lettera greca "lambda" o "L". Qui essa sta per *lunghezza,* con il significato di lunghezza d'onda. Così, questa specifica ci dice la lunghezza d'onda del colore più brillante emesso dall'emettitore di luce. Una lunghezza d'onda tipica è di 0,93 micron.

La **larghezza di banda spettrale** BW λ dà una misura di quanto intenso o concentrato è il colore. Poichè la sorgente luminosa emette altri colori, sia dall'uno che dall'altro lato del suo colore di picco, questo numero ci dice quanto è larga una parte dello spettro emesso, comprendente tutti i colori emessi almeno a metà della luminosità del colore di picco. Un valore tipico è di 500 Angstroms.

La Figura 9.17 dà uno stralcio del data sheet di un emettitore di luce, di cui indica le specifiche più comuni. La Figura 9.18 dà uno stralcio del data sheet di un fotodiodo e le Figure 9.19 e 9.20 fanno parte del data sheet di un fototransistore. Studiando questi data sheet e riferendoli alla nostra discussione sulle specifiche dei semiconduttori, è possibile fare un ulteriore passo nella comprensione dei semiconduttori.

Questo è il nostro ultimo capitolo sui vari semiconduttori in contenitori singoli - chiamati dispositivi "discreti". Nel prossimo capitolo, cominceremo a parlare dei circuiti *integrati*, cioé di dispositivi contenenti molti diodi e transistori, oltre a resistori e connettori, tutti collegati insieme in un circuito funzionale e contenuti entro un unico chip di silicio. Adesso, potete vedere dove ci ha condotti tutta la nostra trattazione - e quando discuteremo di *circuiti integrati,* capirete l'intera evoluzione dell'elettronica dei semiconduttori.

TYPES TIL23, TIL24
P-N GALLIUM ARSENIDE LIGHT SOURCES

absolute maximum ratings

Reverse Voltage at 25°C Case Temperature	. . . . 2 V
Continuous Forward Current at 25°C Case Temperature (See Note 1)	. . . 100 mA
Operating Case Temperature Range	−65°C to 125°C
Storage Temperature Range . . .	−65°C to 150°C
Soldering Temperature (3 Minutes)	240°C

NOTE 1: Derate linearly to 125°C case temperature at the rate of 1 mA/°C. For pulsed operation at higher currents, see Figures 8 and 9.

operating characteristics at 25°C case temperature

PARAMETER		TEST CONDITIONS	TIL23			TIL24			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
P_O	Radiant Power Output	I_F = 50 mA	0.4			1			mW
λ_{peak}	Wavelength at Peak Emission			0.93			0.93		μm
BW_λ	Spectral Bandwidth between Half-Power Points			500			500		Å
θ_{HP}	Emission Beam Angle between Half-Power Points			35			35		
V_F	Static Forward Voltage			1.25	1.5			1.5	V

Figura 9.17

TYPE TIL77
P-N SILICON PHOTODIODE

absolute maximum ratings at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)

Forward Voltage	0.4 V
Reverse Voltage	10 V
Operating Free-Air Temperature Range	−20°C to 80°C
Storage Temperature Range	−20°C to 80°C
Lead Temperature 1/16 Inch from Case for 10 Seconds	240°C

electrical characteristics at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER			TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_{(BR)}$	Breakdown Voltage		$I_R = 10\,\mu A$, $E_v = 0$	10			V
I_D	Dark Current		$V_R = 3$ V, $E_v = 0$		0.25	5	nA
I_L	Light Current	Photoconductive Operation	$V_R = 3$ V, $E_v = 50$ lm/ft²†	1.5	2		μA
		Photovoltaic Operation	$V_R = 0$, $E_v = 50$ lm/ft²†		2		
V_F	Forward Voltage		$I_F = 10\,\mu A$, $E_v = 0$	0.4			V
λ_{peak}	Wavelength at Peak Response				0.57		μm
BW_λ	Spectral Bandwidth between 20-Percent Response Points		$V_R = 3$ V		0.3		μm
C_T	Total Capacitance		$V_R = 3$ V, $E_v = 0$, f = 1 MHz		750		pF

† The common British-American unit of illumination is the lumen per square foot. The name footcandle has been used for this unit in the USA. To convert to units of the International System (SI), use the equivalency:

1 lumen per square foot = 10.764 lux (lumens per square meter).

Figura 9.18

TYPES TIL601 THRU TIL616
N-P-N PLANAR SILICON PHOTOTRANSISTORS

absolute maximum ratings at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

Collector-Emitter Voltage	50 V
Emitter-Collector Voltage	7 V
Continuous Device Dissipation at (or below) 25°C Case Temperature (See Note 1)	50 mW
Operating Case Temperature Range	−65°C to 125°C
Storage Temperature Range	−65°C to 150°C
Soldering Temperature (3 minutes)	240°C

electrical characteristics at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	TYPE	MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_{(BR)CEO}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage	I_C = 100 μA, H = 0	ALL	50			V
$V_{(BR)ECO}$	Emitter-Collector Breakdown Voltage	I_E = 100 μA, H = 0	ALL	7			V
I_L	Light Current	V_{CE} = 5 V, H = 20 mW/cm^2, See Note 2	TIL601 TIL605 TIL609 TIL613	0.5		3	mA
			TIL602 TIL606 TIL610 TIL614	2		5	mA
			TIL603 TIL607 TIL611	4		8	mA

Figura 9.19

			TIL615		
			TIL604 TIL608 TIL612 TIL616	7	mA
I_D	Dark Current	V_{CE} = 30 V, H = 0	ALL	25	nA
		V_{CE} = 30 V, H = 0, T_C = 100°C	ALL	1	μA
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	I_C = 0.4 mA, H = 20 mW/cm^2, See Note 2	ALL	0.15	V

NOTES: 1. Derate linearly to 125°C at the rate of 0.5 mW/°C.
2. Irradiance (H) is the radiant power per unit area incident upon a surface. For this measurement the source is an unfiltered tungsten linear-filament lamp operating at a color temperature of 2870°K.

switching characteristics at 25° C case temperature

PARAMETER		TEST CONDITIONS	TYP	UNIT
t_r	Rise Time	V_{CC} = 30 V, I_L = 800 μA,	1.5	μs
t_f	Fall Time	R_L = 1 kΩ, See Figure 1	15	

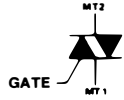
Figura 9.20

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 9

1. La caratteristica distintiva e il pregio principale dei thyristori sono dati dal fatto che:

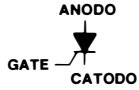
☐ a. Sono i soli dispositivi commutatori a semiconduttore di potenza esistenti
☐ b. La loro velocità di commutazione è più alta di quella della maggior parte dei transistori
☐ c. Sono tipicamente meno costosi dei transistori
☐ d. Sono facili da interdire per mezzo della corrente di comando al gate
☐ e. Per portarli in conduzione completa occorre solo un rapido impulso momentaneo di corrente di gate (per cui si spreca meno potenza nel circuito di comando che con un transistore)

2. Quale dei simboli presentati in questa lezione indicati sotto è quello dell'SCR (rettificatore controllato al silicio, anche chiamato "thyristore a triodo a blocco inverso")?

☐ a. 

☐ b.

☐ c.

☐ d. 

☐ e.

3. Qual'è la principale differenza fra la funzione dell'SCR e quella del triac?
- ☐ a. L'SCR ha prestazioni migliori del triac
- ☐ b. L'SCR è un dispositivo commutatore, mentre il triac è un dispositivo amplificatore
- ☐ c. L'SCR può essere fatto scattare in conduzione in una sola direzione, mentre il triac può venir commutato a condurre corrente sia nell'una che nell'altra direzione.
- ☐ d. L'SCR è fatto di silicio, mentre il triac non lo è
- ☐ e. Dentro ogni triac ci sono due piccoli SCR

4. Qual'è il principale vantaggio del metodo a controllo di fase per la regolazione della potenza erogata da una sorgente di corrente alternata (in cui un dispositivo commutatore - funzionando in modo preciso, ripetitivo - elimina una parte variabile di ogni onda o semionda)?
- ☐ a. Viene dissipata (dispersa) per conversione in calore una potenza molto piccola, perchè la corrente di lavoro non viene mai sottoposta ad una riduzione di flusso - processo, questo, che genera sempre calore
- ☐ b. E' ugualmente applicabile a delle alimentazioni in c.a. e in c.c.
- ☐ c. Fornisce al dispositivo di lavoro una corrente regolare e costante
- ☐ d. Oltre a regolare la corrente alternata, la raddrizza sempre
- ☐ e. L'SCR o il triac può venir usato da solo - senza alcun circuito accessorio di trigger

5. Le specifiche contenute nei data sheet degli SCR e quelle contenute nei data sheet dei triac:
- ☐ a. Non hanno nessuna somiglianza con quelle di qualsiasi altro dispositivo semiconduttore
- ☐ b. Contengono varie versione delle cinque caratteristiche " universali" dei semiconduttori ed altre ancora - in particolare le specifiche della corrente e della tensione di gate richieste per il trigger dei dispositivi
- ☐ c. Sono molto diverse le une dalle altre
- ☐ d. Comprendono la cifra di rumore (NF) e il gudagno di corrente (h_{FE})
- ☐ e. Specificano che la corrente di dispersione passa solo in un senso

6. I fotodiodi e i fototransistori vengono usati:
- ☐ a. Per sentire la luce permettendo alla corrente erogata da una sorgente di potenza di passare in quantità grossomodo proporzionale all'intensità della luce che cade sul dispositivo
- ☐ b. Per generare luce, onde trasmettere informazioni o fornire un'illuminazione utilizzabile
- ☐ c. Per bloccare la corrente quando la luce li colpisce e lasciar passare la corrente quando sono al buio
- ☐ d. Nella sezione "attiva" dei sistemi
- ☐ e. Per gli stessi scopi per cui vengono usati i normali diodi e transistori

7. Quale dispositivo sfrutta il principio per cui la luce che colpisce una giunzione PN caccia via dai loro "ricettacoli" gli elettroni vincolati facendo, così, grandemente aumentare la corrente inversa di dispersione?
- ☐ a. Il fotodiodo
- ☐ b. Il fototransistore
- ☐ c. Il diodo a emissione luminosa (LED)
- ☐ d. Tutti i dispositivi di cui sopra
- ☐ e. Come in a e b

8. La luce in un LED viene generata da:
- ☐ a. Un intenso riscaldamento della giunzione, come per il filamento di una lampada
- ☐ b. Elettroni vincolati, che saltano, spontaneamente, fuori dai loro "ricettacoli", generando un fotone di luce
- ☐ c. Elettroni liberi, che cadono entro delle lacune e cedono la loro energia sotto forma di una particella di luce chiamata fotone
- ☐ d. La generazione di un elettrone libero e di una lacuna
- ☐ e. La conversione di luce infrarossa invisibile proveniente dai dintorni in luce visibile

9. I dispositivi opto-elettronici sono particolarmente utili nei sistemi di sorvaglianza notturna perchè:
- ☐ a. La luce generata dalla maggior parte dei LED è di colore infrarosso invisibile
- ☐ b. I tipici sensori di luce hanno la massima sensibilità al colore infrarosso invisibile
- ☐ c. I dispositivi sono molto economici
- ☐ d. L'esistenza di questi dispositivi non è molto conosciuta
- ☐ e. Come in a e b

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 10

Circuito integrato (IC). E' un circuito elettronico contenente dei transistori e, spesso, dei diodi, dei resistori e dei condensatori, insieme con i conduttori elettrici d'interconnessione trattato e contenuto interamente entro un unico chip di silicio.

Circuito integrato digitale E' un circuito integrato del tipo a commutazione.

Circuito integrato lineare E' un circuito integrato del tipo ad amplificazione.

Fotomaschera E' una lastra trasparente, leggermente più grande di una piastrina di silicio, contenente minuscole macchie opache, usata nel processo di diffusione planare come ombra-maschera su una piastrina rivestita di photoresist, per esporre, in una successiva fase, la superficie della piastrina stessa all'acido, nei punti voluti.

Photoresist E' un materiale plastico liquido che si indurisce, trasformandosi in un solido, tenace e resistente agli acidi, quando viene esposto ai raggi ultravioletti.

IC di qualità militare Tipicamente è un IC le cui prestazioni sono garantite in tutta la gamma di temperatura che va da − 55 a + 125°C.

IC di qualità industriale Tipicamente è un IC le cui prestazioni sono garantite in tutta la gamma di temperatura che va da 0 a 70°C.

CAPITOLO 10

INTRODUZIONE AI CIRCUITI INTEGRATI

I circuiti integrati sono così importanti che abbiamo dedicato ad essi il resto di questo libro. Poichè essi fanno uso di diodi e di transistori che funzionano esattamente come quelli che avete già studiato, non ci sono da imparare delle nuove specifiche. Piuttosto, ci occorre vedere come questi dispositivi vengono messi insieme su un pezzo di silicio per compiere una funzione circuitale completa.

CHE COS'E' UN CIRCUITO INTEGRATO?

Un circuito integrato (o IC) è un circuito elettronico completo, contenente dei transistori e spesso dei diodi, dei resistori e dei condensatori, insieme con i loro conduttori elettrici d'interconnessione, trattato e contenuto interamente entro un unico chip di silicio. Il circuito integrato fu inventato alla Texas Instruments nel 1958 da Jack Kilby. In Figura 10.1 si può vedere l'aspetto generale di un circuito integrato.

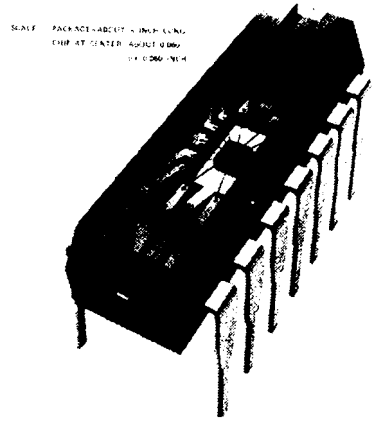


Figura 10.1

La Figura fa vedere come esso apparirebbe se la custodia in plastica fosse semi-trasparente. Cuore del dispositivo è il minuscolo chip di silicio che si vede al centro. Esso è solo un poco più grande del chip usato per un tipico transistore discreto per piccoli segnali. I chip degli IC hanno delle dimensioni maggiori, come vedremo più avanti, ma le dimensioni del chip rappresentato in questa figura e nella prossima non sono insolite. Essi misurano approssimativamente 0,060 pollici (1,524 mm) - ossia circa 1/16 di pollice quadrato (0,403 cm^2).

Tutta la restante massa del dispositivo provvede semplicemente alla comunicazione con l'ambiente esterno ed alla protezione da esso. I massicci terminali metallici sono abbastanza rigidi da permetterne l'inserzione in una scheda a circuito stampato e il robusto contenitore in plastica può venir ribattuto su una scheda senza danneggiare il circuito integrato.

Un tipico chip é rappresentato, molto ingrandito, in Figura 10.2. Si tratta di un chip molto semplice, qui usato per fini illustrativi - la maggior parte dei chip IC è più

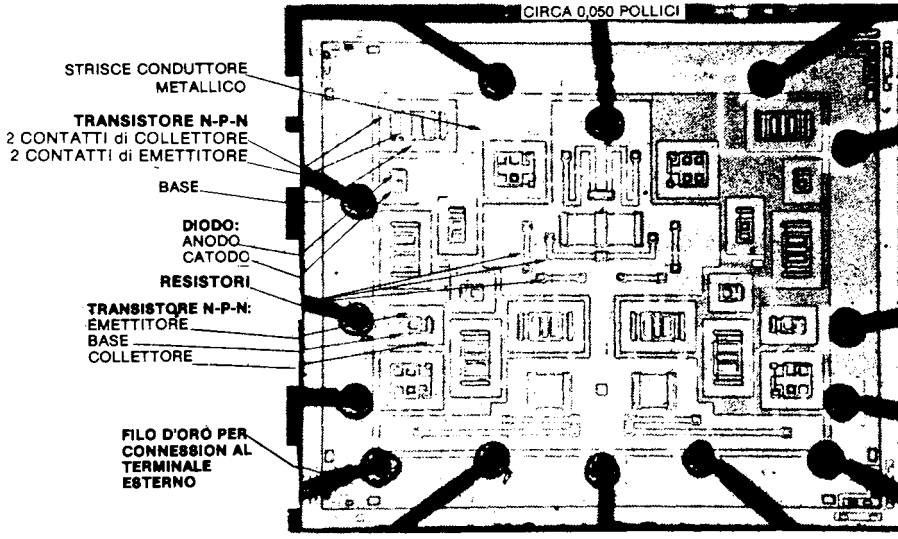


Figura 10.2

grossa e contiene molti più componenti di questo. Le scritte sulla figura indicano alcune delle strutture più importanti.

La circuiteria elettrica contenuta in un IC è una versione miniaturizzata di un circuito che potrebbe essere costituito altrettanto bene con degli ordinari componenti discreti. Infatti, nei primi tempi dello sviluppo degli IC, i circuiti venivano prima costruiti in forma tradizionale impiegando dei componenti discreti - ossia realizzati su "basette" - per essere sicuri che funzionassero a dovere, dopodiché venivano messi sotto forma di IC. Ogni giunzione ed ogni collegamento ha il suo equivalente nell'IC.

Ma, come abbiamo puntualizzato nel trattare i circuiti ed i sistemi, è sufficiente, per la maggior parte dei nostri fini, pensare i circuiti - e questo vale anche per i circuiti integrati - come a *blocchi costitutivi*. In altre parole, quello a cui dobbiamo pensare è cosa fanno i circuiti e come funzionano, senza preoccuparci di come i loro componenti lavorano insieme. Il blocco costitutivo dell'IC rappresentato in Figura 10.2, per esempio, è semplicemente costituito da tre gate NAND con tre ingressi ciascuno e aventi certe prestazioni specificate nel relativo data sheet.

Come tutti i circuiti elettrici, i circuiti integrati sono suddivisi in due classi: *commutatori* e *amplificatori*. Nel mondo degli IC, i circuiti commutatori vengono di solito chiamati *digitali* e i circuiti amplificatori vengono di solito chiamati *lineari*.

QUALI VANTAGGI PRESENTANO I CIRCUITI INTEGRATI?

Tre sono i principali vantaggi ottenuti nel fare un circuito elettronico in forma integrata piuttosto che in forma discreta: le piccole *dimensioni*, il basso costo e l'elevata *affidabilità*. I vantaggi dati dall'avere delle piccole dimensioni vanno ben oltre i casi ovvi di particolari sistemi miniaturizzati, come gli apparecchi per i sordi e i veicoli spaziali. Una circuiteria miniaturizzata permette a sistemi complicatissimi, come i grandi calcolatori, di avere delle dimensioni fisiche contenute - tali da riempire una stanza invece di un magazzzino. Non solo ciò fa risparmiare denaro sull'hardware, gli armadi, i fili e l'ingombro dei sistemi - ma i circuiti piccoli consumano di meno, per cui essi richiedono minori investimenti in apparecchiature di alimentazione e di condizionamento. Inoltre, la velocità di funzionamento di un sistema viene accresciuta riducendo le sue dimensioni, perchè il tempo di trasferimento delle informazioni fra le varie parti del sistema è più breve. In conseguenza di ciò, un sistema più piccolo può espletare in un dato lasso di tempo un maggior numero di compiti decisionali che non una versione più grande dello stesso sistema.

I risparmi risultanti dall'uso dei circuiti integrati non sono, però, solo quelli che vengono resi possibili dalle minori dimensioni. Gran parte dell'economia viene dal diminuito costo di fabbricazione dei circuiti stessi. Il costo di lavorazione di un chip semiconduttore - sia che esso contenga un unico transistore o un IC complesso - è, grosso modo, proporzionale alla sua area, perchè, approssimativamente, lo stesso numero di operazioni di fabbricazione è necessario per produrre una piastrina. Così, concentrando più componenti in meno area di chip, si riduce il costo per componente. Fonte di altri risparmi ancora è il fatto che gli IC significano un minor numero di parti da ordinare, da immagazzinare e da assiemare nel sistema.

Tuttavia, per importanti che siano i vantaggi di avere delle piccole dimensioni e un basso costo, essi vengono messi in ombra dal vantaggio rappresentato da una maggiore affidabilità. Affidabilità significa che un circuito o un sistema funzionerà per un lungo periodo di tempo senza essere affetto da cattive prestazioni o da rotture (breakdowns). Un sistema a IC ha molte minor probabilità di guastarsi che non una versione discreta dello stesso sistema. La ragione principale dell'affidabilità estremamente elevata dei sistemi a IC è che essi richiedono molto meno giunti a saldare e connessioni meccaniche. In qualsiasi sistema a semiconduttori, è il guastarsi di queste interconnessioni - e *non* il guastarsi dei componenti - che determina il maggior numero di danni al sistema. Inoltre, poichè l'uso di IC significa un minor numero di componenti montati separatamente, c'è meno probabilità che vengano fatti errori nell'assemblaggio e usati dei dispositivi difettosi.

In un senso più esteso, i vantaggi dei circuiti integrati vengono apprezzati nel modo migliore quando si tiene conto della tendenza storica dei sistemi verso una sempre maggior complessità. Un numero sempre maggiore di componenti e di funzioni circuitali viene usato in ogni sistema. La nostra civiltà domanda ,anno dopo anno, dei sistemi elettronici più complessi. Per arrivare, a questa complessità, il *costo* e le *dimensioni* dei sistemi devono venir mantenuti entro limiti ragionevoli. E l'affidabilità di ogni parte deve continuamente migliorare, in modo che i sistemi possano funzionare senza guastarsi ogni pochi minuti.Con i circuiti integrati si sono fatti passi da gigante verso il raggiungimento di questa estrema complessità.

QUALI SONO LE LIMITAZIONI DEI CIRCUITI INTEGRATI?

Malgrado gli straordinari pregi degli IC, le cui capacità continuano ad aumentare di anno in anno e che soppiantano un numero sempre maggiore di componenti elettronici discreti, essi hanno tuttora delle limitazioni ben definite (al momento in cui scriviamo). La più importante è che gli IC devono limitarsi a dei valori comparativamente bassi della potenza e della tensione e ad un limitato assortimento di componenti che possono essere integrati economicamente.

La limitazione di *potenza* è, principalmente, una conseguenza delle piccole dimensioni degli IC. Quanta più corrente un dispositivo porta, tanto più calore esso genera, come abbiamo visto. Se questo calore è concentrato in un minuscolo dispositivo, esso produce delle temperature abbastanza elevate da poter danneggiare o distruggere l'elemento. In conseguenza, il pregio rappresentato dalle dimensioni degli IC è soggetto a dei compromessi che sacrificano la capacità di portare corrente. Ciò limita la maggior parte degli IC a delle applicazioni aventi a che fare con *l'informazione,* piuttosto che con il *lavoro.* Perfino i moderni calcolatori, che fanno uso di IC per l'elaborazione di informazioni, usano tuttora dei circuiti discreti a transistori di potenza per l'emissione ai dispositivi di lavoro.

Analogamente, le tensioni negli IC devono essere mantenute piuttosto basse, perchè l'isolamento, fra gli elementi di un circuito, è relativamente basso, per il fatto che i componenti sono molto ravvicinati fra loro in uno stesso chip di materiale. Il tipico valore nominale della tensione degli IC è compreso fra cinque e venti Volt. Se si supera questa tensione, l'isolante si perfora in un punto o nell'altro, provocando un corto circuito.

Diciamo che l'assorbimento dei componenti è limitato, perchè, benchè il silicio di un chip di IC sia il materiale ideale per i transistori e i diodi, esso non funziona troppo bene per gli altri componenti dei circuiti. I resistori, per esempio, tendono a dare dei valori di resistenza non giusti. Malgrado i più precisi controlli, sono tipiche delle tolleranze di resistenza del 15% - contro delle tolleranze dell'1% per dei transistori discreti economici. Inoltre, quanto più alto è il valore della resistenza, tanto più spazio richiede un resistore in un circuito integrato; un resistore da 40.000 Ω rappresenta il limite economico approssimativo e richiede altrettanto spazio quanto diversi transistori. I condensatori presentano dei problemi di spazio ancora maggiori che non i resistori.

Questi serbatoi per l'immagazzinamento temporaneo degli elettroni richiedono delle grandi aree. Un valore di capacità di soli 20 picofarad (20 trilionesimi di Farad) richiede più spazio di vari transistori. Purtroppo, molti comuni circuiti elettronici richiedono capacità milioni di volte maggiori. Analogamente, gli induttori, come i trasformatori, sono quasi impossibili da produrre su un chip di silicio.

A causa delle limitazioni, i sistemi elettronici tipici impiegano il minor numero possibile di questi componenti difficili da integrare. Ma essi, tuttavia, richiedono pur sempre alcuni resistori, condensatori, induttori, trasformatori e dispositivi semiconduttori di potenza discreti. Degli ingegnosi progettisti di sistemi hanno aggirato queste limitazioni creando dei circuiti che fanno uso dei transistori e diodi di bassa potenza - che sono economici e facili da integrare - per costruire dei circuiti che *funzionano* altrettanto bene quanto quelli che richiedono dei componenti di difficile integrazione.

Le ricompense sono grandi e i sistemi in cui i componenti difficoltosi sono stati eliminati completamente sono i tipi di sistemi più radicalmente integrati - un classico esempio di questo orientamento è dato dai potenti calcolatori digitali. Da parte loro, i fabbricanti di circuiti integrati stanno continuamente ampliando gli orizzonti delle applicazioni, specialmente nell'area della capacità di portare potenza.

Eppure, malgrado queste limitazioni, il valore in dollari degli IC venduti è di gran lunga superiore a quello dei dispositivi discreti; al momento in cui scriviamo, gli IC sono il punto di riferimento delle vendite future.

COME VENGONO FABBRICATI I CHIP DEI CIRCUITI INTEGRATI?

Siamo di nuovo su un terreno che ci è familiare, perchè i chip a IC vengono fatti con le tecniche di diffusione planare che abbiamo precedentemente trattato. Una tipica piastrina a IC del diametro di due pollici (Figura 10.3), quando è completamente diffusa, può contenere centinaia di chip IC, ognuno dei quali è, in se stesso, un

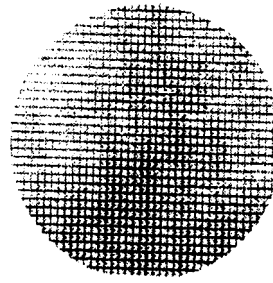


Figura 10.3

circuito completo. La piastrina a circuito integrato qui considerata, contiene più di 600 circuiti integrati, noti come tipo "SN 7400".

In Figura 10.4 si può vedere il principio su cui si basa la struttura di un semplice circuito su un chip a circuito integrato.

Questo non è un circuito particolarmente utile ma serve da illustrazione. Esso mostra la struttura e la tecnica d'interconnessione per i tre componenti IC più comuni - un resistore, un diodo e un transistore NPN.

Partiamo da una piastrina di silicio tagliata da un cristallo di tipo P ottenuto per accrescimento. Vengono quindi fatte tre successive diffusioni di impurità (N, P, N), attraverso delle finestre di forma opportuna, aperte con acido sulla pellicola di ossido di silicio. Dopo ogni diffusione, le finestre vengono ricoperte da un nuovo strato di ossido. Dopo che un complesso definitivo di finestre è stato aperto, sull'ossido viene depositato uno strato di oro o di alluminio metallizzato, che penetra attraverso l'ultimo complesso di finestre entrando in contatto con il silicio. Ancora una volta si fa uso di acido per corrodere e asportare tutto il metallo, ad eccezione di certe strisce, di cui si desidera la presenza. In questo modo si forma un tracciato di condutto-

ri elettrici e si formano pure delle "piazzole di fissaggio" agli estremi di certi conduttori, dove, durante il processo di assiemaggio, dopo che il chip è stato tagliato dalla piastrina, vengono attaccati dei sottili fili di oro.

Sono evidenti in Figura 10.4 la struttura del transistore NPN e quella del diodo PN. Il resistore è semplicemente una striscia lunga e stretta di materiale tipo P (circondata da una regione N), attraverso la quale viene incanalata la corrente per mezzo di connessioni metallizzate applicate ai due estremi. Si può ottenere il valore di resistenza voluto aggiustando la lunghezza e la larghezza di diffusione del resistore tipo P durante la progettazione del circuito.

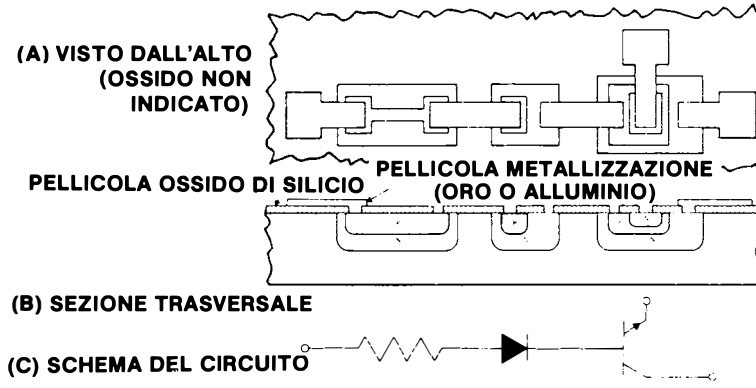


Figura 10.4

Poichè tutti i componenti fanno parte della stessa piastrina di silicio, potrebbe sembrare che essi possano cortocircuitarsi a vicenda. La vista della sezione trasversale, peraltro, fa vedere che ognuno di essi è elettricamente separato (isolato) dagli altri grazie all'azione da valvola a senso unico delle giunzioni PN. Affinchè la corrente convenzionale prenda il cammino di corto circuito non voluto, per esempio, dal resistore tipo P alla regione di collettore tipo N del transistore, essa dovrebbe passare da P a N, poi a P e quindi a N. Senonchè, il passaggio da N a P in questo percorso è interdetto dall'azione a diodo - per cui questa corrente di cortocircuito viene bloccata. Tutte le altre possibili vie di cortocircuito sono similmente bloccate da giunzioni PN. Di conseguenza, la corrente è costretta a prendere il cammino voluto attraverso i componenti.

COME VIENE COMPIUTA LA FOTOMASCHERATURA?

Le complicate operazioni necessarie per corrodere le finestre occorrenti nell'ossido e asportare con acido parti della metalizzazione vengono compiute con delle tecniche fotografiche. Per ogni operazione di attacco chimico, viene preparata una lastra trasparente avente le dimensioni dell'intera piastrina.

Su questa lastra, l'immagine di ogni minuscola finestra appare sotto forma di una macchia opaca (questa lastra, chiamata "fotomaschera", viene preparata per ri-

duzione fotografica di uno speciale pezzo più grande; la riduzione viene quindi ripetuta centinaia di volte sulla lastra, una volta per ogni IC esistente sulla piastrina). La superficie superiore della piastrina, ricoperta di ossido, viene rivestita con una sottile pellicola di plastica liquida chiamata "photoresist".

La fotomaschera viene quindi sospesa sulla piastrina rivestita, come indicato in Figura 10.5, e si proiettano dall'alto, sulla piastrina, dei raggi ultravioletti.

Questi raggi fanno indurire il photoresist, che si trasforma in uno strato solido di plastica tenace e resistente agli acidi - tranne dove cade l'ombra dei punti opachi

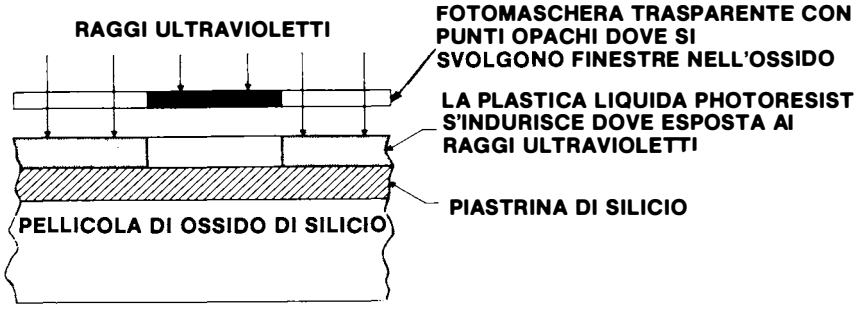


Figura 10.5

della fotomaschera. I punti di plastica non resistente - dov'erano le zone d'ombra - vengono lavati via in un bagno di solvente, esponendo l'ossido di silicio dove devono aprirsi le finestre. Quindi, la piastrina viene immersa in acido, che corrode via la pellicola di ossido ad eccezione di dove essa è protetta dal photoresist indurito. Adesso abbiamo nell'ossido le finestre volute. Il photoresist solido viene asportato con uno speciale solvente e la piastrina è pronta per il forno a diffusione. Questa tecnica di fotomascheratura è l'operazione chiave nel processo di diffusione planare che sta alla base dell'industria dei semiconduttori.

COME VENGONO RACCHIUSI IN CONTENITORI I CIRCUITI INTEGRATI?

I chip a IC vengono montati e muniti di fili, quasi allo stesso modo dei transistori discreti - vedi Figura 10.1. Esistono diversi tipi di contenitori; ogni tipo ha i suoi pregi e le sue limitazioni. La Figura 10.6 presenta un campionario rappresentativo dei tipi di custodie. I più usati, al momento in cui scriviamo, sono i vari formati di custodie in plastica ("dual - in - line"si riferisce alle due file di terminali esistenti in questi tipi di contenitori).

Una delle ragioni per cui queste custodie hanno delle dimensioni diverse è che dei circuiti integrati più complessi, anche se il chip ad essi occorrente non è molto più grande, richiedono un maggior numero di terminali e quindi un contenitore più grande. A questo punto converrà definire tre termini che avrete senz'altro incontrato nel corso delle vostre letture:

Integrazione su piccola scala (SSI), che si riferisce a circuiti integrati aventi fino a 9 gate.

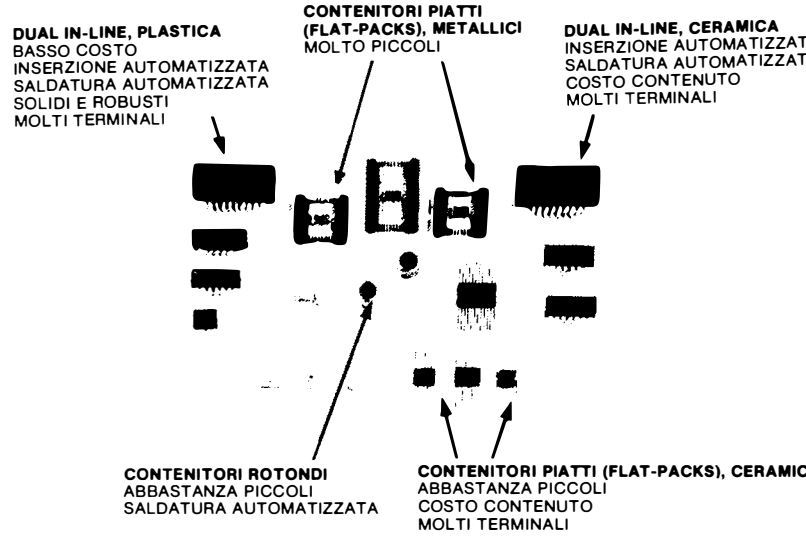


Figura 10.6

Integrazione su media scala (MSI), che si riferisce ai circuiti integrati aventi da 10 a 100 gate.

Integrazione su larga scala (LSI), che si riferisce ai circuiti integrati aventi più di 100 gate.

Come vedremo in seguito, i dispositivi LSI stanno portando sempre più in alto i loro limiti superiori di complessità e sono già in uso comune dei circuiti di lavoro contenenti varie migliaia di gate

COME VENGONO PROVATI I CIRCUITI INTEGRATI?

Dopo l'assemblaggio ogni singolo circuito integrato viene sottoposto a molte prove, per verificare le sue prestazioni elettriche ed assicurare che esso risponda alle specifiche contenute nei data sheet. Come per ogni altro circuito elettrico, le prestazioni degli IC *variano* con la temperatura del circuito, perchè il comportamento dei singoli *componenti* risente della temperatura. Perciò, per ogni tipo di IC, viene specificata, nel suo data sheet, una gamma di temperature.

Nella maggior parte dei casi, gli IC provenienti da una linea di produzione vengono prima provati in funzionamento nella gamma di temperature comprese fra 0 e 70°C; queste prove sono soddisfacenti per la maggior parte delle applicazioni commerciali e industriali. Gli IC che superano queste prove vengono poi, di solito, provati nella gamma —55°C + 125°C; i circuiti che superano le prove in questa gamma

di temperature sono adatti per la maggior parte delle applicazioni militari e aerospaziali .Le due classi, stabilite per ogni tipo di IC, sono chiamate *industriale* e *militare*.

Questo sistema di classifica degli IC dà ai clienti dell'industria e del commercio un prodotto soddisfacente a un prezzo minore di quello che sarebbe altrimenti possibile. Oltre alla maggior tolleranza di temperatura richiesta, i tipi militari, molto spesso, hanno limiti più stretti sulle loro prestazioni garantite.

Nel capitolo 11, esamineremo più a fondo i circuiti integrati, concentrando la nostra attenzione sugli IC digitali e sulle loro molte applicazioni.

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 10

1. Perchè i circuiti integrati si dividono in due categorie (digitali e lineari)?
- ☐ a. Questi nomi si riferiscono a due tipi generali di contenitori
- ☐ b. Queste sono le due gamme di temperature, o classe, in cui gli IC vengono classificati in seguito alle prove
- ☐ c. Gli IC sono semplicemente dei circuiti a cui capita di essere costruiti integralmente e che, come tutti i circuiti, sono del tipo a commutazione o del tipo ad amplificazione
- ☐ d. Un tipo elabora l'informazione e l'altro controlla grossi dispositivi di lavoro, come i motori
- ☐ e. Gli IC vengono usati o per scopi d'immissione o per scopi di emissione

2. Quali vantaggi presentano gli IC sui circuiti a dispositivi discreti, grazie alla loro maggior complessità (più circuiteria meno area)?
- ☐ a. Dimensioni minori
- ☐ b. Maggior affidabilità
- ☐ c. Migliori prestazioni complessive
- ☐ d. Costo più basso
- ☐ e. Tutto come sopra tranne c

3. Quali sono le limitazioni dei circuiti integrati?
- ☐ a. Non tutti i componenti elettronici possono venir efficentemente integrati in un chip di silicio
- ☐ b. Gli IC sono generalmente più costosi degli equivalenti dispositivi discreti.
- ☐ c. Gli IC sono limitati a delle tensioni piuttosto basse
- ☐ d. Gli IC possono sostenere una potenza dissipata (riscaldamento) relativamente piccola
- ☐ e. Tutto come sopra tranne b

4. Quale processo viene usato per produrre gli elementi semiconduttori a IC?
- ☐ a. Giunzione ad accrescimento
- ☐ b. Giunzione a lega
- ☐ c. Diffusione a mesa
- ☐ d. Diffusione planare
- ☐ e. Un nuovo processo speciale limitato agli IC

5. Quali dei seguenti componenti elettronici di uso comune non si trovano negli ordinari IC?
- ☐ a. Induttori
- ☐ b. Diodi
- ☐ c. Resistori
- ☐ d. Transistori
- ☐ e. Condensatori a bassa capacità

6. I componenti in un chip a IC ordinario sono elettricamente isolati uno dall'altro da:
- ☐ a. Uno strato di ossido di silicio fra i componenti e il substrato
- ☐ b. Giunzioni PN fra ogni componente e il substrato tipo P (la corrente convenzionale non può passare da N a P)
- ☐ c. Uno strato di silicio non "drogato" che può non condurre elettricità
- ☐ d. Una pellicola sottile di plastica photoresist

☐ e. Non sono isolati ma la corrente scorre liberamente da uno all'altro di essi e fra essi

7. Un resistore in un ordinario chip a IC viene ottenuto:
☐ a. Saldando in loco un transistore discreto
☐ b. Depositando una striscia di uno speciale materiale resistivo sopra la pellicola di ossido
☐ c. Facendo uso di un diodo (che conduce una corrente inversa di dispersione) come resistore
☐ d. Diffondendo una striscia lunga e stretta di regione P attraverso una regione N più grande
☐ e. Riducendo una striscia metallica d'interconnessione, sovrapposta all'ossido, a una larghezza molto piccola

8. Quale metodo si usa per aprire delle minuscole finestre nello strato di ossido onde diffondere delle impurità in aree scelte della piastrina di silicio?
☐ a. Una delicata tecnica manuale facente uso di minuscoli attrezzi meccanici
☐ b. Le finestre si hanno naturalmente grazie alla ossidazione irregolare del silicio
☐ c. Fotograficamente, facendo cadere delle minuscole zone di ombra sulla piastrina, onde ottenere dei fori in una pellicola plastica sensibile alla luce, facendo seguire a tale operazione un bagno in acido per corrodere l'ossido sottostante ai fori
☐ d. Un proceso segreto "rivoluzionario" non possibile con dispositivi discreti
☐ e. Un pennello elettronico simile a quello usato in un tubo a raggi catodici

9. Perchè la custodia dual-in-line in plastica è il più usato contenitore degli IC?
☐ a. E' economica
☐ b. E' facile da inserire e saldare in basette a circuito stampato per mezzo di apparecchiature automatiche
☐ d. E' una delle custodie più piccole possibili
☐ e. Tutto come sopra tranne d

10. Perchè gli IC forniti da una linea di produzione vengono classificati, durante la fase delle prove elettriche, in due categorie?
☐ a. Le prestazioni dei circuiti risentono sempre della temperatura. La categoria militare lavora entro una gamma di temperature più estesa che non la categoria industriale
☐ b. Si fa uso dell'elettricità o per elaborare le informazioni o per compiere un lavoro
☐ c. Gli IC sono di tipo digitale o lineare
☐ d. Le prestazioni dei circuiti risentono sempre della frequenza di funzionamento. I tipi militari possono funzionare a frequenze più elevate che non i tipi industriali
☐ e. Queste designazioni si riferiscono semplicemente a diversi tipi di custodia.

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 11

Convertitore di codice E' un tipo di blocco-digitale decisionale, che converte l'informazione ricevuta ai suoi ingressi in un altro codice digitale, che viene trasmesso alle sue uscite, chiamato anche codificatore o decodificatore.

Selettore di dati E' un tipo di blocco digitale decisionale, che inoltra i dati provenienti da uno qualsiasi dei suoi diversi ingressi alla sua uscita.

Multiplexer E' un tipo di blocco decisionale, che inoltra i dati ricevuti dal suo unico ingresso ad una qualsiasi delle sue uscite.

Registro E' un gruppo di flip-flop usati insieme per memorizzare diversi bit. Una sua variante è il *registro a scorrimento.*

Contatore E' un blocco digitale di tipo memorizzatore, che conta gli impulsi ricevuti al suo ingresso e trasmette il totale alle sue uscite.

Logica positiva E' una logica per cui *la più alta* delle due tensioni logiche sta per "uno" o "sì" e *la più bassa* sta per "zero" o "no".

Memoria a sola lettura (ROM) E' un blocco digitale solitamente classificato come di tipo memorizzatore. che contiene delle informazioni scritte in permanenza in esso durante la sua fabbricazione, le quali possono venir "lette" alle uscite ma *non variate* ("scritte").

Logica negativa E' una logica per cui *la più bassa* delle due tensioni logiche sta per "uno" o "sì" e *la più alta* sta per "zero" o "no".

Margine di rumore Specifica elettrica di un blocco digitale, che descrive con quanta sicurezza il blocco trasmette e riceve delle informazioni corrette, malgrado la presenza di segnali elettrici caotici, non voluti, chiamati "rumore", che tendono ad insinuarsi in qualsiasi collegamento di comunicazioni. E' il "margine di sicurezza" esistente fra le tensioni in uscita V_{OH} e V_{OL} prodotte dal blocco trasmittente e le tensioni in ingresso V_{IH} e V_{IL} richieste dal blocco ricevente.

Fan-out (guadagno logico) Specifica elettrica di un blocco digitale; è dato dal numero di altri blocchi a cui il primo blocco è capace di trasmettere - cioè dal numero di ingressi che un'uscita può pilotare. E' determinato dalla capacità di corrente dell'uscita divisa per il fabbisogno di corrente di un'ingresso.

Velocità di funzionamento E' data da alcune specifiche elettriche (a volte chiamate caratteristiche di commutazione) di un blocco digitale, che descrivono con quanta rapidità il blocco funziona ("prende una decisione"). Di solito, vengono espresse come *tempi di ritardo della propagazione* t_{PLH} e t_{PHL}.

Dissipazione di potenza E' una specifica elettrica di un blocco digitale (di solito, non formalmente garantita in un data-sheet perchè essa dipende da tante variabili), che dice quanti Watt di potenza vengono consumati dal blocco e convertiti in calore durante il funzionamento normale.

DTL Logica a diodi e transistori: qualsiasi circuito logico di gate che faccia uso di vari diodi per compiere la funzione AND od OR, seguito da uno o più transistori per aggiungere potenza al segnale in uscita (ed eventualmente invertirlo). In passato molto usato nei sistemi digitali ma ora largamente soppiantato dai circuiti TTL.

TTL Logica a transistori - transistori: qualsiasi circuito logico di gate, che faccia uso di un transistore multiemettitore NPN per compiere la funzione AND positiva, seguito da uno o più transistori per aggiungere potenza al segnale in uscita (ed eventualmente invertirlo). La velocità di funzionamento è generalmente superiore a quello dei DTL.

54-74 TTL E' una serie (originata dalla Texas Instruments) di blocchi digitali, che impiegano come unità base di gate un gruppo di certi circuiti TTL molto simili.

ECL Logica ad accoppiamento di emettitore: è un tipo di circuito impiegato come gate logico, notevole per la sua altissima velocità di funzionamento e per l'alta potenza dissipata. Usato principalmente in grandi calcolatori digitali ad altissima velocità e venduto soprattutto in base a esigenze di progetto del cliente.

CAPITOLO 11

CIRCUITI INTEGRATI DIGITALI

Esistono due estese categorie di circuiti integrati. Gli IC "lineari" contengono una circuiteria tipo amplificatore e ne tratteremo nel capitolo 12. Gli IC "digitali" contengono una circuiteria tipo commutatore e ne parleremo esclusivamente in questo capitolo. Se è passato un certo tempo da quando avete studiato i primi capitoli di questo libro - su come l'informazione venga trasmessa con tecniche digitali, come vengono prese delle decisioni digitali per mezzo di gate logici e come l'informazione digitale venga memorizzata per mezzo di flip-flop sarà meglio spendere alcuni minuti per rivedere i Capitoli 1, 3 e 4. Questo capitolo si basa su questi concetti fondamentali.

CHE COSA SONO I CIRCUITI INTEGRATI DIGITALI?

Gli IC digitali sono degli IC la cui funzione fondamentale è di elaborare le informazioni *digitali* per mezzo di circuiti commutatori. Ricorderete che l'altro impiego generale dei circuiti commutatori è di controllare la potenza per dei dispositivi di lavoro come i motori. Ma i tipici IC non sono ancora applicabili per quest'uso, a causa della limitazione a livelli di potenza piuttosto bassi che abbiamo discusso nel capitolo 10.

COME VENGONO USATI I CIRCUTI INTEGRATI DIGITALI?

Gli IC digitali vengono usati per *elaborare* le informazioni e per *memorizzarle* in sistemi digitali come i calcolatori, le calcolatrici da tavolo, i controlli numerici per macchine utensili e gli strumenti contatori di frequenza. Quando usano gli IC, i progettisti di tali sistemi non hanno bisogno di spender tempo e fatica nel mettere insieme dei transistori per ottenere dei gate e dei flip-flop. Essi non hanno neppure bisogno di mettere insieme dei gate e dei flip-flop per ottenere dei circuiti più complessi. Invece, essi possono progettare servendosi di blocchi più grandi, costituiti da *molti* gate e flip-flop, come la sezione "addizionatore" della semplice addizionatrice che abbiamo discusso nei capitoli 3 e 4. Infatti, la maggior parte dei blocchi più grandi occorrenti ai progettisti di sistemi digitali è disponibile sotto forma di IC. In conseguenza, per studiare gli IC digitali, occorre far conoscenza con alcuni dei blocchi standard.

I blocchi digitali possono essere immaginati semplicemente come delle scatole con ingressi e uscite per le informazioni digitali, più le connessioni di alimentazione di massa, come indicato in Figura 11.1. La maggior parte dei blocchi

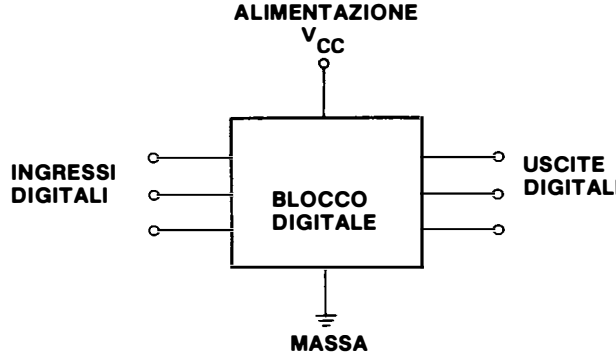


Figura 11.1

digitali disponibili sotto forma di IC può venir classificata come appartenente alla categoria *decisionale* o a quella delle memorie. Gli IC decisionali vengono anche chiamati "IC logici" e sono principalmente costituiti da gate: gli IC "di memoria" hanno come componenti più importanti i flip-flop.

QUALI SONO ALCUNI BLOCCHI DECISIONALI TIPICI?

Un blocco del tipo decisionale, usato comunemente, è *l'addizionatore*. Ricorderete che ne abbiamo descritto uno nel capitolo 3. La Figura 11.2 mette in evidenza il principio su cui si basa un addizionatore.

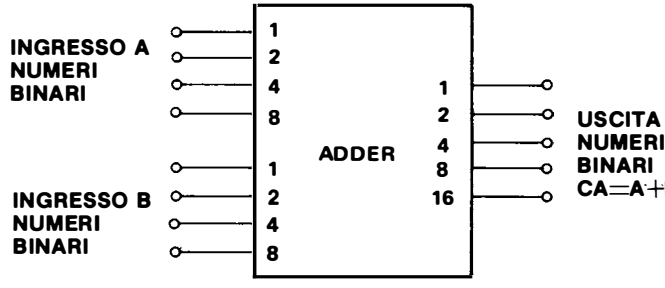


Figura 11.2

I segnali in entrata sono costituiti da due numeri binari e l'uscita è la somma di questi due numeri sotto forma binaria. Chiaramente, si ha a che fare con un dispositivo che prende delle decisioni. L'addizionatore, contrariamente ai blocchi costitutivi di memoria, non contiene nessun flip-flop.

Un altro comune blocco decisionale è quello noto come "convertitore di codice". Ricorderete che il "baby computer" da noi realizzato nel capitolo 4 include un convertitore di codice. I convertitori di codice sono anche chiamati "codificatori" e "decodificatori". Nella sezione "sentire" del nostro baby computer c'è un blocco che converte il codice decimale proveniente dalla tastiera in un codice binario adatto all'addizionatore. Un convertitore di codice cosiffatto è visibile in Figura 11.3.

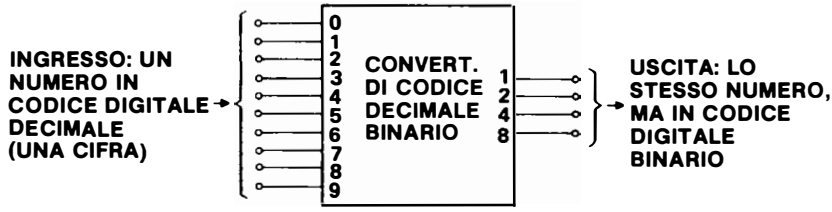


Figura 11.3

Analogamente, nella sezione "agire" del nostro computer, appare un blocco che non solo *converte* il codice binario in segnali adatti ad azionare l'indicatore luminoso, ma fornisce anche potenza per *pilotare* i diodi a emissione luminosa.

Altri due blocchi decisionali sono riportati in Figura 11.4. Il *settore di dati* e il *multiplexer* vengono tipicamente usati insieme come una specie di sistema a tavolo di commutazione per informazioni digitali. In questo complesso, il selettore di dati collega una qualsiasi delle sue otto entrate alla sua unica uscita, su comando impartito dai segnali digitali ricevuti alle sue entrate "selezione". Quindi, il multiplexer instrada le informazioni provenienti dal suo unico ingresso ad una qualunque delle sue otto uscite, così come ordinato dai segnali immessi nei suoi terminali "selezione". Così il selettore di dati e il multiplxer funzionano come una specie di posto di smistamento ferroviario, per i segnali d'informazione.

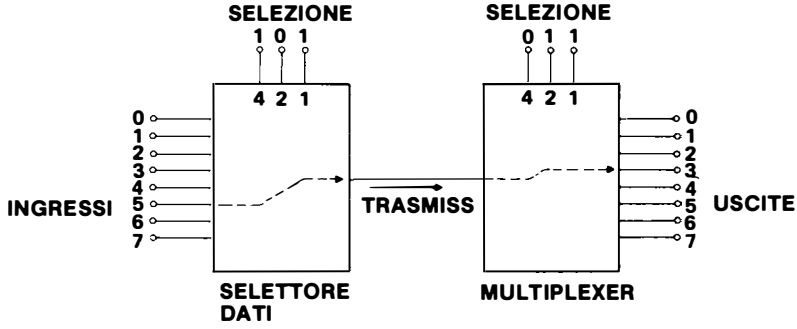


Figura 11.4

Esistono, naturalmente molti altri tipi di blocchi digitali decisionali, ma i pochi che abbiamo descritto sono fra i più comunemente usati e sono sufficienti per indicare le loro quasi illimitate possibilità.

QUALI SONO ALCUNI BLOCCHI DI MEMORIA TIPICI?

Gli odierni sistemi digitali impiegano vari generi di memorie, fra cui le memorie a nuclei magnetici, quelle a dischi magnetici e quelle a nastri magnetici. Ma la tendenza attuale è di sostituire questi dispositivi di vecchia data con delle memorie a semiconduttori. Questi circuiti a semiconduttore sono chiamati "flip-flop" e sono essenzialmente costituiti da gate logici.

Il conteggio binario rende relativamente semplici le memorie per sistemi digitali. Tutto ciò che occorre è una tecnica per memorizzare gli uni e gli zeri logici in certe posizioni, in modo che essi possano venir letti quando ce ne sia bisogno. Questa funzione è molto simile a quella di scrivere e di leggere dei segni (numeri) su un pezzo di carta, durante l'esecuzione manuale di una lunga divisione - essa semplicemente immagazzina l'informazione, finché non siete pronti a farne uso.

Un flip-flop è un elemento di memoria perchè esso è in grado di trattenere, o agganciare, il suo segnale d'uscita in uno stato particolare, quando ordinato. Esso salta (flip) a uno e ricade (flop) a zero, quando riceve gli appropriati comandi in ingresso. Esistono vari tipi di circuiti di flip-flop, ma, per il nostro esempio, faremo uso di un tipo semplice chiamato "tipo - D", indicato in Figura 11.5.

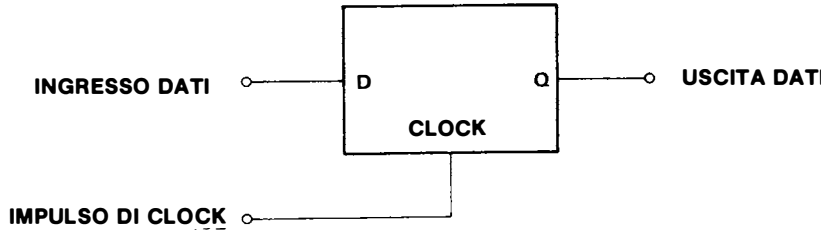


Figura 11.5

L'uscita Q rimane costante, finchè l'ingresso del clock è uno zero logico. Ma, quando il clock dà un impulso - va cioè a uno e poi torna a zero - questo fa in modo che l'uscita ripeta qualsiasi stato ci sia all'ingresso D in quel momento e che lo mantenga fino al successivo impulso dei clock.

Quando in un sistema occorre memorizzare dei *gruppi* di bit ("parole"), si fa uso di diversi flip-flop sotto una qualche specie di comando unificato.

Una combinazione di questo tipo viene chiamata "registro". Nel capitolo 4, abbiamo discusso una varietà di registro chiamata "registro a scorrimento", in cui l'uscita di ogni flip-flop alimenta l'ingresso di un altro, in una serie di flip-flop. Nel registro a scorrimento, quando tutti i flip-flop sono fatti scattare simultaneamente dal clock, dei bit di dati si spostano, un passo dopo l'altro, lungo il registro, dall'ingresso del primo flip-flop all'uscita dell'ultimo flip-flop.

Un altro tipo di registro, in cui diversi bit possono venir immessi o ricavati *simultaneamente,* viene chiamato registro *parallelo.* Il blocco di memoria nel nostro "baby computer" del capitolo 4 è una combinazione in parallelo di quattro registri a scorrimento da due bit.

Ancora un altro comune blocco costitutivo di memoria è il *contatore*. Un tipico contatore è rappresentato in Figura 11.6. Questo blocco, conta gli impulsi digitali

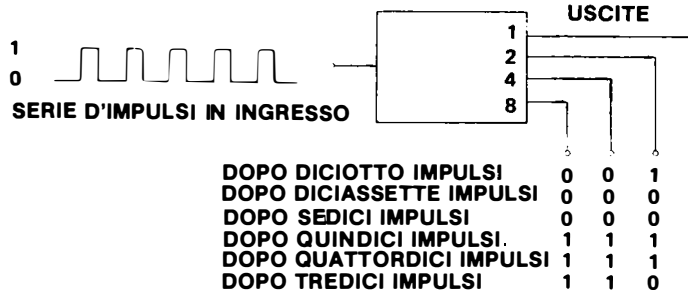


Figura 11.6

ricevuti alla sua unica entrata e *ricorda* il totale complessivo. Il totale viene quindi presentato alle quattro uscite come un numero binario di quattro bit. Una parte della sequenza di conteggio è riportata nella figura. Questo particolare contatore è studiato in modo che, quando il totale arriva a 1111 (15) esso torna a 0000 all'impulso successivo. I contatori possono essere fatti in modo da tornare a zero dopo essere arrivati praticamente a qualsiasi numero. Un contatore che torni a zero dopo un totale di *nove,* viene chiamato contatore "decadico". Un contatore che torni a zero dopo essere arrivato a *undici,* sarà chiamato contatore "dividi - per dodici", etc. Certi contatori contano sia all'indietro che in avanti e sono chiamati "up-down" counters.

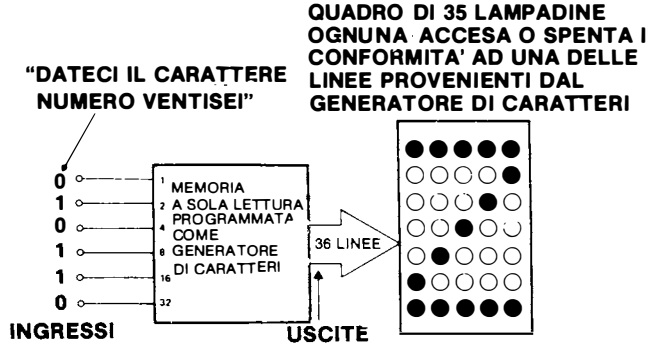


Figura 11.7

Un altro tipo di blocco che viene di solito classificato come del tipo a memoria è la *memoria a sola lettura* (ROM). In una ROM, l'informazione viene memorizzata in forma permanente durante la costituzione del circuito, principalmente grazie alla configurazione delle interconnessioni. "Memoria a sola lettura" significa che l'informazione può essere *solamente* letta, ma non scritta o cambiata. Un uso comune della ROM è quello come generatore di caratteri.

La ROM rappresentata in Figura 11.7 è una particolare memoria che contiene 2240 bit d'informazione disposti in 64 parole (gruppi di bit); ciascuna di 35 bit. Una qualsiasi delle parole può essere richiamata alle trentacinque linee di uscita, applicando l'opportuno numero di binario (da zero a 63) agli ingressi. Ognuna delle 35 uscite comanda una lampadina nel quadro di 35 lampadine, disposte cinque per sette

In Figura 11.7 il comando in ingresso ha richiamato la parola memorizzata nella posizione numero 26 e questa parola produce l'immagine del carattere "Z" nel quadro di lampadine. In questa memoria, ogni parola produce un carattere diverso (una lettera, un numero, un segno d'interpunzione, etc.) su comando - di qui il nome di "generatore di caratteri".

QUALI SPECIFICHE SI TROVANO SUI DATA SHEET DEGLI IC DIGITALI?

I data sheet di tutti i blocchi digitali esistenti sotto forma di IC sono assai simili in formato. Le Figure da 11.8 a 11.14 presentano un completo data sheet di circuito integrato per un registro a scorrimento da otto bit.

Le specifiche più importanti si dividono in due classi: *funzionali* ed *elettriche*. Le specifiche funzionali dicono cosa fa il blocco a IC - quali decisioni prende. Le specifiche elettriche, molto similmente a quelle dei dispositivi discreti, descrivono il circuito in base alle sue caratteristiche elettriche.

Poichè le specifiche *funzionali* ci dicono cosa fa l'IC con le informazioni che riceve, queste specifiche sono normalmente espresse mediante una *tabella della verità,* che già conoscete bene.

Benchè vi siano familari le tabelle della verità che fanno uso dell'uno e dello zero, sarà bene sappiate che c'è una recente tendenza a usare al posto dell'uno e dello zero le lettere "H" e "L". Nel descrivere le tabelle della verità, vi ricorderete che abbiamo detto che, *di solito,* la tensione alta rappresenta l'uno e la tensione bassa lo zero. Ma, dopotutto, sta al progettista decidere a quale dei due numeri corrisponde una tensione. La maggior parte dei progettisti dà il valore uno alla tensione più alta; questa viene chiamata logica "positiva" ed è di gran lunga la più usata. Ma vi sono alcuni sistemi in cui il valore "alto" rappresenta lo zero - un'alternativa nota come logica "negativa". Così, una tabella della verità facente uso di un "H" e di un "L" vale in entrambi i casi.

Ma si noti questa avvertenza: con una logica positiva, per un tipico blocco, si ottiene una tabella della verità interamente *diversa* da quella che si otterrebbe scegliendo una logica negativa. Ciò significa che il blocco compie una *funzione completamente diversa.* Potrete accertarvene, prendendo la tabella della verità per il gate AND che abbiamo riportato come esempio e cambiando tutti gli uno in altrettanti zeri e tutti gli zeri in altrettanti uno. La tabella della verità che ne risulta è la tabella della verità per una funzione OR. Per riassumere le varianti, un gate che compie la funzione AND facendo uso di una logica positiva agirà come un gate OR, facendo uso di una logica negativa. Analogamente, un gate OR positivo diventa un gate AND negativo. Così, una specifica funzionale completa include la designazione "positivo" o "negativo". Come avrete probabilmente dedotto, un invertitore è sempre un invertitore.

Fra le **specifiche elettriche** di un blocco digitale ve ne sono alcune che già ben conosciamo. Ma, in più, ci sono quattro importanti specifiche che potremo chiamare "caratteristiche universali degli IC digitali" perchè valgono per tutti i blocchi digitali:

Il **margine di rumore** descrive con quanta sicurezza un blocco trasmette e ricava delle informazioni corrette, malgrado la presenza di "rumore". La capacità di un

ricetrasmettitore di discriminare fra rumore e dati reali dipende principalmente dal "margine di sicurezza" fra la tensione (per i due stati logici) *prodotta* dall'uscita trasmittente e quella *richiesta* dall'entrata ricevente.

Queste tensioni sono specificate nel data sheet come V_{OH}, V_{OL} V_{IH} e V_{IL}. In questi simboli si ha "O" = uscita, "I" = ingresso, "H" = alto, "L" = basso. Il margine di rumore, anche se di solito non viene specificato separatamente nel data sheet, è dato semplicemente da V_{OH} meno V_{IH} e da V_{IL} meno V_{OL}. Le tensioni in uscita si riferiscono qui al blocco *trasmittente* e le tensioni in ingresso, al bocco *ricevente*. Per esempio, se entrambi i blocchi sono dei circuiti della famiglia di IC digitali 54/74 TTL,

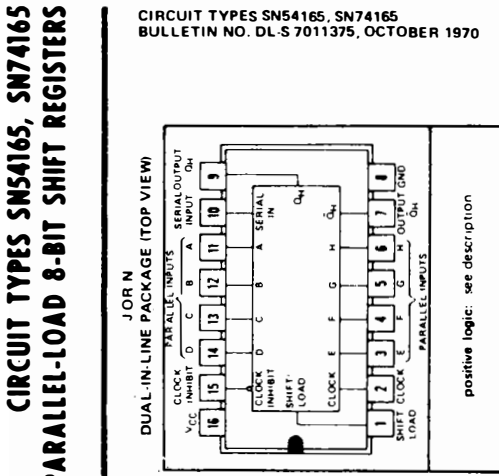


Figura 11.8

il margine di rumore ha un valore garantito di almeno 0,4 V. Ciò significa che un sistema di trasmissione può essere disturbato da un rumore di (fino a) 0,4 Volt, senza che ne risulti una ricezione delle informazioni non corretta.

Il **fan-out** (guadagno logico) di un blocco costitutivo digitale è dato dal numero di altri blocchi che esso è capace di pilotare. Il fan-out è determinato dalle *correnti* nominali, così come il margine di rumore dipende dalle *tensioni* nominali. Per

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)		7 V
Input voltage (see Note 1)		5.5 V
Interemitter voltage (see Note 2)		5.5 V
Operating free-air temperature range	SN54165 Circuits	−55°C to 125°C
	SN74165 Circuits	0°C to 70°C
Storage temperature range		−65°C to 150°C

NOTES 1 Voltage values, except interemitter voltage, are with respect to network ground terminal.
2 This is the voltage between two emitters of a multiple-emitter transistor. For this circuit, this rating applies to the shift/load input in conjunction with the clock or clock-inhibit inputs.

recommended operating conditions

		SN54165			SN74165			UNIT
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage, V_{CC}		4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
Normalized fan-out from each output, N	High logic level			20			20	
	Low logic level			10			10	
Input clock frequency, f_{clock}		0		20	0		20	MHz
Width of clock input pulse, $t_{w(clock)}$		25			25			ns
Width of load input pulse, $t_{w(load)}$		15			15			ns
Clock-enable setup time, t_{setup} (see Figure 1)		30			30			ns
Parallel input setup time, t_{setup} (see Figure 1)		10			10			ns
Serial input setup time, t_{setup} (see Figure 2)		20			20			ns
Shift setup time, t_{setup} (see Figure 2)		45			45			ns
Hold time at any input, t_{hold}		0			0			ns
Operating free-air temperature, T_A		−55	25	125	0	25	70	°C

esempio, nella serie 54/74 TTL, un'uscita nello stato di alta tensione può erogare 400 microampere di corrente. Un ingresso in questo stato richiede 40 microampere. Perciò, il fan-out è dato da 400 diviso per 40 - per cui l'uscita può pilotare 10 ingressi e ha un fan-out di 10.

Le specifiche relative alla **velocità di funzionamento** dei blocchi digitali sono molto simili a quelle dei dispositivi discreti. La velocità di funzionamento di un bloc-

CIRCUIT TYPES SN54165, SN74165
PARALLEL-LOAD 8-BIT SHIFT REGISTERS

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER			TEST CONDITIONS†	SN54165 MIN	SN54165 TYP‡	SN54165 MAX	SN74165 MIN	SN74165 TYP‡	SN74165 MAX	UNIT
V_{IH}	High-level input voltage			2			2			V
V_{IL}	Low-level input voltage					0.8			0.8	V
V_I	Input clamp voltage		V_{CC} = MAX, I_I = −12 mA			−1.5			−1.5	V
V_{OH}	High-level output voltage		V_{CC} = MIN, V_{IH} = 2 V, V_{IL} = 0.8 V, I_{OH} = −800 μA	2.4			2.4			V
V_{OL}	Low-level output voltage		V_{CC} = MIN, V_{IH} = 2 V, V_{IL} = 0.8 V, I_{OL} = 16 mA			0.4			0.4	V
I_I	Input current at maximum input voltage		V_{CC} = MAX, V_I = 5.5 V			1			1	mA
I_{IH}	High-level input current	Load input	V_{CC} = MAX, V_I = 2.4 V			80			80	μA
		Other inputs				40			40	
I_{IL}	Low-level input current	Load input	V_{CC} = MAX, V_I = 0.4 V			−3.2			−3.2	mA
		Other inputs				−1.6			−1.6	
I_{OS}	Short-circuit output current§		V_{CC} = MAX	−20		−55	−18		−55	mA
I_{CC}	Supply current		V_{CC} = MAX, See Note 3		42	63		42	63	mA

NOTE 3: With the outputs open, clock inhibit and shift/load at 4.5 V, and a clock pulse applied to the clock input, I_{CC} is measured first with the parallel inputs at 4.5 V, then with the parallel inputs grounded.

†For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions for the applicable device type.

‡All typical values are at V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C.

§Not more than one output should be shorted at a time.

Figura 11.9

co ci dice, in sostanza, con quanta rapidità esso sia in grado di prendere una decisione. Essa è data dal tempo che l'IC richiede, dopo che l'info mazione è stata ricevuta ad un ingresso, perchè la decisione venga riportata ad un'uscita. I data sheet degli IC, di solito, specificano questo parametro di funzionamento sotto forma di *tempi di ritardo di propagazione* t_{PLH} è il tempo richiesto affinché una decisione

switching characteristics, V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C, N = 10

PARAMETER¶	FROM (INPUT)	TO (OUTPUT)	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
f_{max}			C_L = 15 pF, R_L = 400 Ω, See figures 1 thru 3	20	26		MHz
t_{PLH}	Load	Any			21	31	ns
t_{PHL}					27	40	
t_{PLH}	Clock	Any			16	24	ns
t_{PHL}					21	31	
t_{PLH}	H	Q_H			11	17	ns
t_{PHL}					24	36	
t_{PLH}	H	$\bar{Q}_H$			18	27	ns
t_{PHL}					18	27	

¶ f_{max} ≡ Maximum input count frequency
t_{PLH} ≡ Propagation delay time, low-to-high-level output
t_{PHL} ≡ Propagation delay time, high-to-low-level output

See mechanical data and ordering instructions starting on page 1-1 of TTL Integrated Circuits Catalog (CC201) or page S1-1 of the TTL Catalog Supplement (CC301)

Figura 11.10

passi da basso ad alto e t_{PLH} è il tempo necessario a una decisione per passare da alto a basso.

Le specifiche relative alla **dissipazione di potenza** dai blocchi digitali differiscono alquanto da quelle dei dispositivi discreti. Nel caso dei dispositivi, vogliamo sapere quanta potenza o quanto calore l'unità possa *tollerare,* senza riscaldarsi tan-

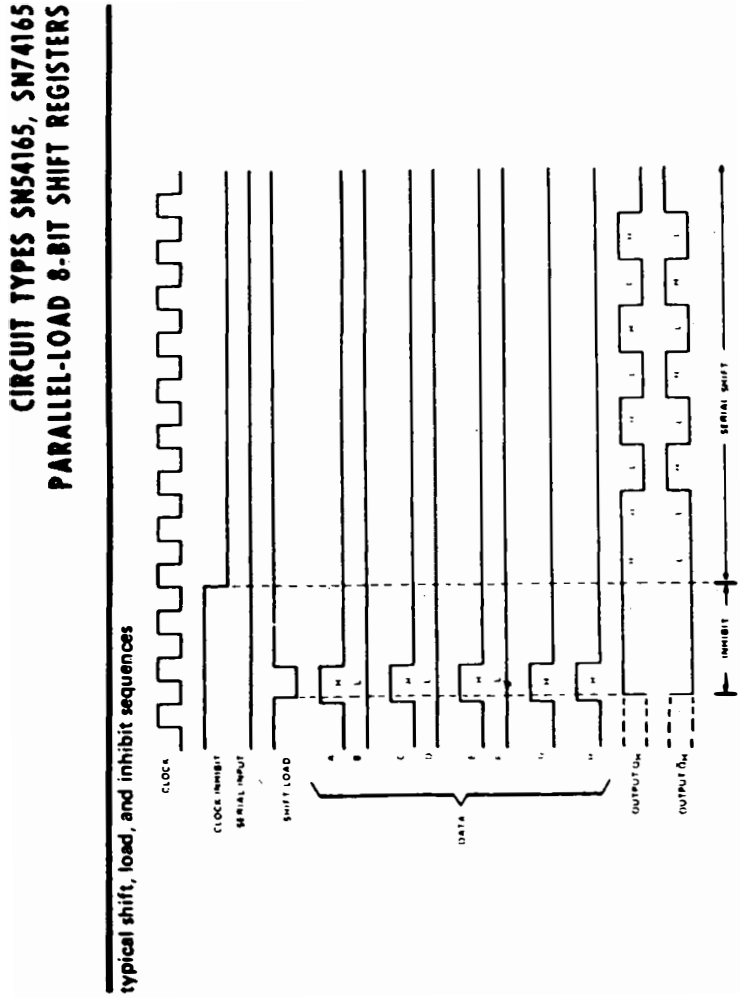


Figura 11.11

to da presentare delle disfunzioni. Ora, un IC digitale dissipa potenza, come qualsiasi altro componente elettronico, ma, noi, normalmente, vogliamo sapere quanta potenza esso *consuma* e non a quanta potenza esso può *resistere*. In altre parole, la dissipazione di potenza specificata di un IC ci dice quanta potenza esso consuma

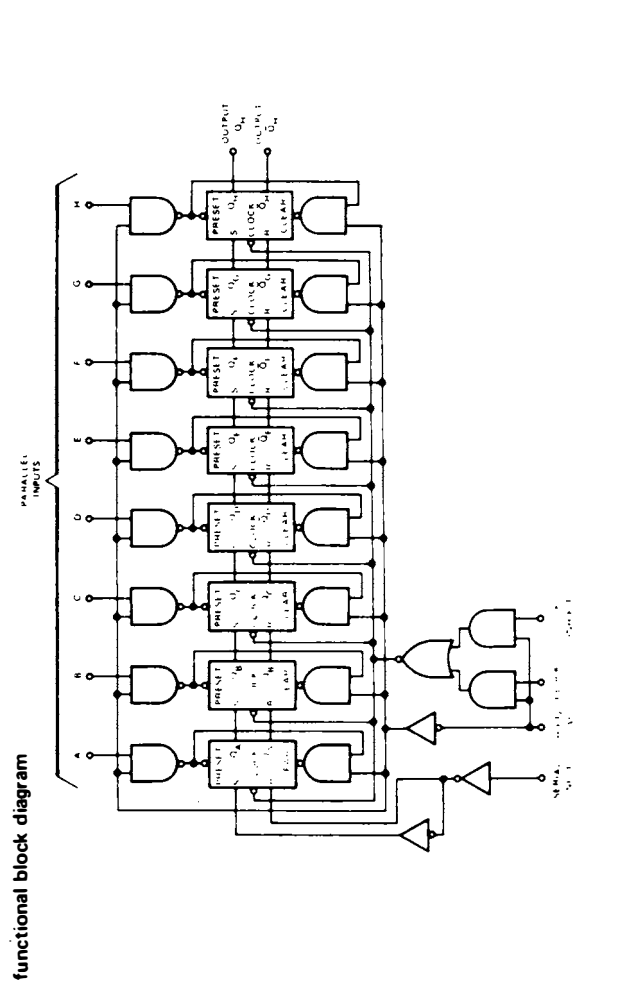
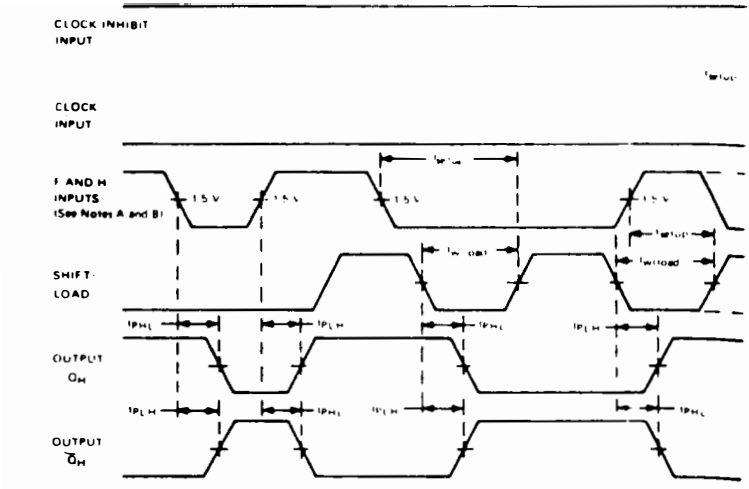
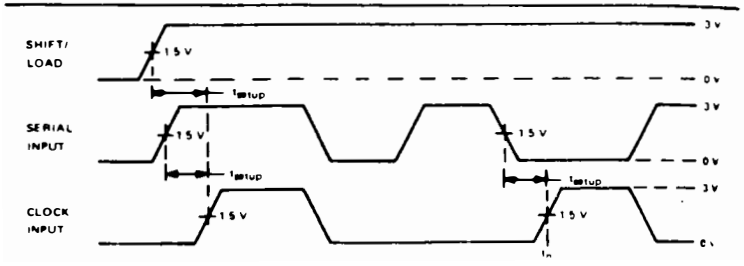


Figura 11.12

nel funzionamento normale, per conversione in calore, analogamente a quanto fatto per la potenza nominale di una lampadina. Poichè la potenza dissipata di un dato blocco può variare largamente a seconda delle sue condizioni d'impiego al momento considerato, i data sheet, normalmente, riportano questa specifica in modo piut-





NOTES A. The eight data inputs and the clock inhibit input are low. Results are monitored at output Q_H at t_{n+7}

B. The input pulse generators have the following characteristics: $t_r \leq 10$ ns, $t_f \leq 10$ ns, PRR $\leq$ 1 MHz, duty cycle $\leq$ 50%, $Z_{out} \approx 50\ \Omega$

FIGURE 2—VOLTAGE WAVEFORMS

Figura 11.13

tosto informale. In condizioni di funzionamento tipiche, i gate 54/74 TTL possono dissipare circa 10 milliWatt per gate.

COME FUNZIONANO I CIRCUITI INTEGRATI DIGITALI?

Gli IC digitali funzionano combinando dei gate e dei flip-flop (che sono sostanzialmente costituiti da gate) in una disposizione logica destinata a produrre un dato segnale in uscita, una volta dato un certo segnale in ingresso. Così, se sapete come funzionano i vari circuiti di gate, avrete una buona idea di come funzionano gli IC. Abbiamo già parlato dei tre gate fondamentali: AND, OR e Invertitore. Abbiamo

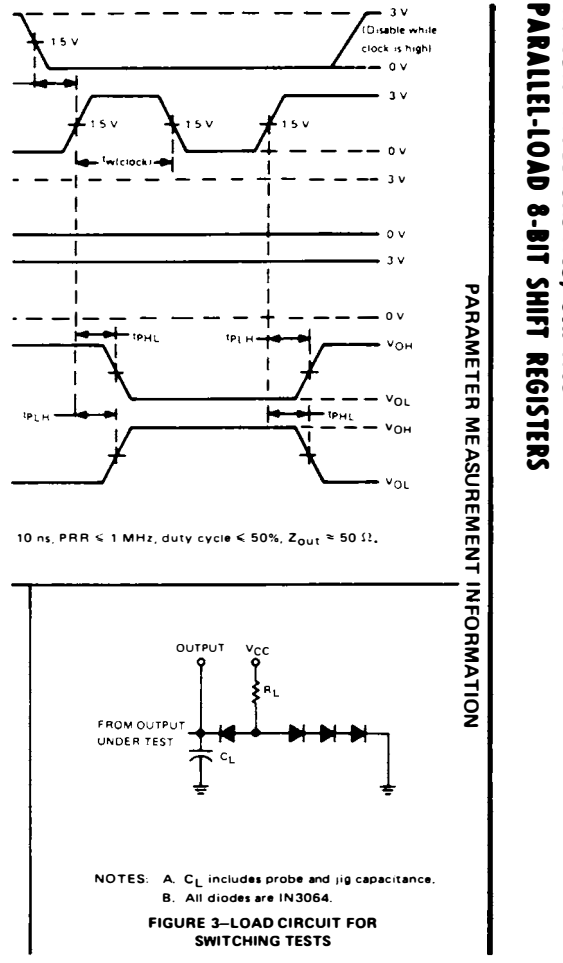


Figura 11.14

anche parlato delle due più comuni modifiche dei circuiti fondamentali: i gate NAND e NOR. La capacità della circuiteria integrata consiste nel mettere insieme un assortimento di questi gate necessario per compiere la funzione logica richiesta e, quindi, nel riprodurre i componenti elettrici e le interconnessioni di questi gate in un unico chip di silicio.

Un numero qualsiasi di disposizioni circuitali diverse può funzionare come gate logico. Nel capitolo 5, per esempio, avete visto come i diodi possano esser seguiti da un transistore per aggiungere potenza al segnale in uscita. In Figura 11.15

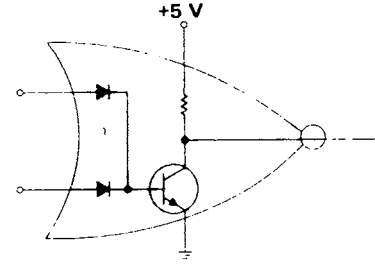


Figura 11.15

potete vedere un semplice gate DTL (logica a diodi e transistori), da noi già realizzato nel capitolo 5. Esso è un gate NOR *Positivo*. Nel capitolo 5, lo abbiamo riportato come un gate NAND. Ma, fino a quel momento, parlavamo riferendoci a correnti e tensioni di *elettroni*. Adesso, però, siete diventati più sofisticati e sapete che facevamo uso di una logica *negativa*. Così, questo gate è un gate NAND *negativo*, ma anche un gate NOR positivo.

Questo circuito DTL dà un'idea generale di come funzionino i circuiti di gate. Una tensione alta a uno dei due ingressi fornisce una corrente di base che manda in conduzione il transistore. Questo ,allora ,collega l'uscita direttamente a massa dando un'uscita a "bassa". Ma, quando nessuno dei due ingressi è alto, il transistore rimane all'interdizione e il resistore collegato all'alimentazione provvede a dare un'uscita "alta".

Notate la figura tracciata intorno a questo circuito. Il triangolo curvilineo indica che il circuito è un gate OR e il circolo al suo vertice significa negazione, per cui il circuito viene identificato come un gate NOR. Le logiche DTL e i tipi più vecchi di logiche di cui avrete sentito parlare - RTL, RCTL, DCTL, DTL e CTL stanno ormai passando alla storia. I progettisti di sistemi li hanno largamente abbandonati in favore dei tipi di logiche oggi più usati, i TTL. "TTL" semplicemente sta per "transistor - transistor logic".

La Figura 11.16 rappresenta un gate NAND positivo facente uso di una logica TTL. Si noti che l'area ombreggiata indica che esso è un gate AND e che l'uscita è invertita - il che ne fa un gate NAND.

Il transistore in ingresso è del tipo NPN con una regione *distinta* di emettitore per ogni ingresso. Così, esso funziona sostanzialmente come tre diodi, come indicato dalla figura piccola. Insieme con il resistore, esso funziona come un AND positivo. Cioè la corrente di alimentazione scorre fuori dalla sua uscita soltanto finchè entrambe le entrate sono "alte". L'uscita di questo gate interno è invertita e amplificata dal resto dei circuiti, dando luogo a una funzione NAND positiva all'uscita.

Una logica TTL di questo genere è diventata molto comune, in gran parte a causa del suo eccellente margine di rumore, del suo elevato fan-out, della sua elevata velocità di funzionamento e della sua bassa potenza dissipata.

La maggior parte dei blocchi costitutivi digitali TTL sono identificati come membri della "serie 54/74". "54" significa che il dispositivo è addetto ad un funzionamento nella gamma di temperature *militare;* "74" significa che esso è adatto alla

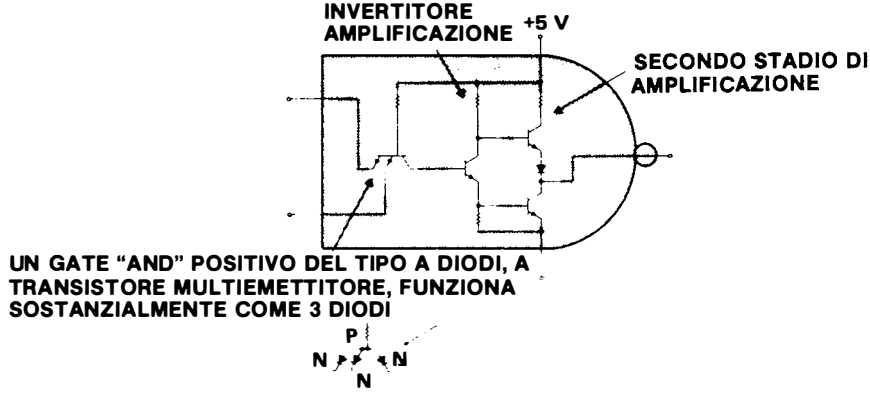


Figura 11.16

gamma di temperature *industriale*, che non è altrettanto restrittiva. Una lettera, che segue immediatamente questi due numeri, può indicare che l'IC è una modifica del tipo di dispositivo normale (che non ha nessuna lettera): un "L" significa che il dispositivo è progettato per una potenza dissipata *bassa;* un "H" significa che esso è progettato per una velocità di funzionamento più alta; e un "S" significa che degli speciali diodi chiamati "diodi a barriera Schottky" sono stati incorporati nella circuiteria, per fare aumentare la velocità di funzionamento - al costo di un aumento di potenza dissipata minima se non addirittura nulla.

Il nostro campione di data sheet include il numero del tipo "SN54165". "SN" è semplicemente il prefisso di tutti i circuiti integrati; 54", come abbiamo detto, indica che il dispositivo è adatto alla gamma di temperature −55°C+ 125°C. Il fatto che non c'è nessuna lettera che segue il numero "54" indica che esso è un circuito *normale.* "165" è semplicemente il numero sequenziale di questo circuito nella serie.

La sua *combinazione* di caratteristiche eccellenti è ciò che ha fatto della sua logica TTL, di gran lunga, la favorita dei progettisti di sistemi. E la serie 54/74 vanta la velocità di funzionamento seconda in grandezza fra tutti i tipi di logiche. Ma c'è un tipo di logica ancor più veloce - l'ECL, o logica di accoppiamento di emettitore. Tuttavia, l'ECL paga la sua alta velocità di funzionamento con un forte aumento di dissipazione di potenza e il suo margine di rumore e il suo fan-out non sono considerati buoni come quelli dei TTL. L'ECL viene quasi esclusivamente usato in calcolatori molto grandi, in cui la velocità più elevata rende convenienti gli altri sacrifici.

Il nostro esame dei circuiti integrati digitali è adesso così completo come lo permettono le dimensioni di questo libro. Nel prossimo capitolo parleremo dei circuiti integrati MOSFET (transistori a effetto di campo metallo - ossido - semiconduttore), poi finiremo con una trattazione dei circuiti integrati lineari

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 11

1. Perché vengono chiamati "digitali" praticamente tutti i circuiti integrati tipo commutatore? Perchè essi:
- ☐ a. Hanno all'incirca le dimensioni e la forma di un dito
- ☐ b. Elaborano informazioni digitali
- ☐ c. Mandano in conduzione e all'interdizione dei grossi dispositivi di lavoro
- ☐ d. "Di" in "digitale" significa "due", con riferimento ai due impieghi dell'elettricità nei sistemi - elaborare informazioni e compiere un lavoro
- ☐ e. Tutto come sopra, tranne b

2. I sistemi elettronici digitali, dalla nostra semplice addizionatrice del capitolo 4 ai grandi calcolatori, funzionano per mezzo di:
- ☐ a. Circuiti di tipo amplificatore che prendono decisioni analogiche
- ☐ b. Gate logici che prendono decisioni servendosi di informazioni digitali
- ☐ c. Flip-Flop (e vari tipi di unità di memoria non a semiconduttore) che memorizzano informazioni digitali
- ☐ d. Leve e canne meccaniche, di volta in volta azionate dall'elettricità
- ☐ e. Come in b e c

3 I sistemi elettronici digitali vengono progettati mettendo insieme dei blocchi costitutivi disponibili sotto forma di circuiti integrati, che possono venir classificati come:
- ☐ a. Blocchi che elaborano informazioni o compiono un lavoro
- ☐ b. Logiche positive o negative
- ☐ c. Di tipo decisionale (o logico),costituiti principalmente da gate o di tipo a memoria, contenenti principalmente dei flip-flop
- ☐ d. Funzionali ed elettrici
- ☐ e. Commutatori ed amplificatori

4. Il significato delle abbreviazioni "H" e "L" nelle descrizioni funzionali (tabelle della verità) dei blocchi costitutivi digitali è:
- ☐ a. Tensione più alta e tensione più bassa, con riferimento ai due livelli dei segnali digitali binari
- ☐ b. Potenza più alta e potenza più bassa, con riferimento a queste due classi di dispositivi a semiconduttori
- ☐ c. Frequenza alta e frequenza bassa
- ☐ d. Corrente alta e corrente bassa
- ☐ e. Velocità alta e velocità bassa

5. In un certo circuito agisce come un gate OR quando usato con logica negativa ($H = 0$, $L = 1$), che funzione compirà quando usato con logica positiva ($H = 1$, $L = 0$)?
- ☐ a. AND
- ☐ b. OR
- ☐ c. NOT
- ☐ d. NAND
- ☐ e. NOR

6. Il margine di rumore, che (quando è piccolo) dà un'indicazione di quanto è probabile che un'informazione comunicata fra dei blocchi costitutivi digitali non sia corretta per effetto del rumore, dipende da:
- ☐ a. La capacità di erogare corrente in uscita e la corrente richiesta in ingresso
- ☐ b. Il "margine di sicurezza" fra la tensione di uscita prodotta dal blocco trasmittente e la tensione in ingresso richiesta dal blocco ricevente per ognuno dei due stati logici
- ☐ c. La potenza erogata in uscita e la potenza richiesta in ingresso per i due stati logici
- ☐ d. Il "margine di sicurezza" fra il livello di rumore e la cifra di rumore
- ☐ e. La cifra di rumore (NF)

7. La capacità di fan-out di un blocco digitale dipende dalla capacità di corrente della sua uscita e dalla corrente richiesta da ogni ingresso pilotato da quella uscita e può venir definita come:
- ☐ a. Il numero di altri ingressi che può trasmettere ad un ingresso
- ☐ b. La massima dissipazione di potenza (calore generato) che l'unità può sopportare
- ☐ c. La quantità di raffreddamento a mezzo ventilazione ("fanning out" del calore) richiesta
- ☐ d. Il numero di ingresso a cui un'uscita può trasmettere
- ☐ e. Come in b e c

8. "Velocità di funzionamento" è la denominazione generica della velocità di cui è capace ogni dispositivo o circuito a semiconduttori. Nel data-sheet di un blocco digitale, essa viene tipicamente espressa sotto forma di:
- ☐ a. Frequenza di f_T
- ☐ b. Capacità C
- ☐ c. Chilometri all'ora o centimetri al secondo
- ☐ d. Tempi di ritardo della propagazione per entrambi le possibili transizioni di uscita: t_{PHL} e t_{PLH}
- ☐ e. Ritardo dovuto al tempo di "riscaldamento" trascorso dal momento in cui si inserisce l'alimentazione a quando è possibile il normale funzionamento

9. La dissipazione di potenza specificata dalla maggior parte dei dispositivi a semiconduttori *discreti* è il massimo assoluto del calore prodotto che si garantisce possa venir sostenuto dal dispositivo. Ma la dissipazione di potenza, normalmente specificata per i blocchi digitali (di solito non formalmente garantita nel data sheet), è:
- ☐ a. La stessa che si ha nella maggior parte dei dispositivi a semicoduttori discreti
- ☐ b. La quantità di potenza consumata e converita in calore nel funzionamento normale
- ☐ c. Un limite minimo richiesto per mantenere abbastanza alte le temperature di funzionamento
- ☐ d. Il fan-out moltiplicato per il margine di rumore
- ☐ e. Di fatto non ha niente a che vedere con la dissipazione di potenza

10. Le sigle TTL (transistor-transistor logic), DTL (diode-transistor logic) ed ECL (emitter-coupled logic), che vengono frequentemente usate con riferimento a certe "famiglie" di circuiti integrati digitali, sono, in realtà, i nomi di:

- ☐ a. Ditte che hanno dato origine a queste famiglie
- ☐ b. Alternative alla logica positiva e negativa
- ☐ c. Varietà di logiche positive e negative
- ☐ d. Dispositivi speciali a semiconduttori simili ai transistori
- ☐ e. Varietà generali di circuiti elettronici usate come gate logici, con cui, in sostanza, sono costituiti i blocchi costitutivi in ogni serie.

GLOSSARIO RELATIVO AL CAPITOLO 12

FET Transistore a effetto di campo (Field effect transistor) è un transistore controllato in *tensione* anziché in corrente. Il flusso della corrente di lavoro attraverso un *canale* semiconduttore viene commutato e regolato dall'*effetto di campo* elettrico esercitato dalla carica elettrica in una regione vicina al canale chiamata *gate*. Chiamato anche transistore *unipolare*. Un FET ha una costruzione a *canale P* o a *canale N*.

MOS Metallo - ossido - semiconduttore; ci si riferisce a un transistore a effetto di campo (MOSFET), che ha un gate di *metallo* isolato dal canale *semiconduttore* da uno strato di *ossido*. Un MOSFET può essere del tipo ad *arricchimento* (enhancement-type), normalmente interdetto, o del tipo a impoverimento (depletion - type), normalmente in conduzione. Con MOS, inoltre, ci si riferisce a dei circuiti integrati che fanno uso di MOSFET (praticamente tutti del tipo ad arricchimento).

FET a giunzione E' un FET il cui elemento di gate è una ragione di materiale semiconduttore (ordinariamente il substrato), isolata da una giunzione PN rispetto al canale, che è di un materiale di polarità opposta. Tutti i FET a giunzione sono del tipo ad impoverimento (normalmente in conduzione).

Source (Sorgente) E' il terminale di corrente di lavoro (a un estremo del canale in un FET), che è la *sorgente* delle lacune (canale P) o degli elettroni liberi (canale N), che scorrono nel canale. Corrisponde all'*emettitore* dei transistori bipolari.

Drain (Scarico) E' il terminale della corrente di lavoro (ad un estremo del canale in un FET) che è lo *scarico* delle lacune o degli elettroni liberi provenienti dal canale. Corrisponde al *collettore* dei transistori bipolari.

Gate (Porta) E' costituito dal terminale di controllo (o di comando) e dalla regione di controllo (o di comando) di un transistore a effetto di campo. Corrisponde alla *base* di un transistore bipolare.

Bipolare Nome generico dato ai transistori NPN e PNP, in quanto la corrente di lavoro passa attraverso materiale semiconduttore *dell'una o dell'altra polarità* (P e N). Viene anche dato ai circuiti integrati che fanno uso di transistori bipolari.

RAM Memoria ad accesso casuale (random-access memory). E' un certo tipo di blocco costitutivo di memoria, comunemente disponibile sotto forma di IC MOS, di solito costituito da un certo numero di flip-flop. Dei bit d'informazione binaria possono, a volontà, venir "scritti" in - o "letti" da - uno qualsiasi dei flip-flop.

Op-amp (Amplificatore operazionale) E' un amplificatore non specializzato, comunemente usato sotto forma di IC, caratterizzato da un guadagno di tensione estremamente alto e da entrate differenziali. Originariamente era usato per operazioni matematiche nei calcolatori analogici, ma ora, praticamente, viene impiegato ogni qualvolta occorra un amplificatore a bassa potenza.

Circuiti d'interfaccia. Nome dato alla Texas Instruments ad un gruppo di IC che agiscono come unità di ingresso e di uscita ("interfacce") delle informazioni nei sistemi digitali. Si tratta, in sostanza, di amplificare dei segnali digitali. Comprendono i "driver" (piloti) delle memorie, gli amplificatori per sensori, i driver e i ricevitori di linea e i driver delle unità periferiche.

CAPITOLO 12

MOS E CIRCUITI INTEGRATI LINEARI

I circuiti integrati che abbiamo finora visto sono tutti "bipolari", perchè fanno tutti uso di transistori bipolari - l'unico tipo di transistori che abbiamo studiato. I circuiti integrati MOS, per contro, fanno uso di una diversa specie di strutture, ossia dei transistori ad effetto di campo (FET).

COSA SONO I CIRCUITI INTEGRATI MOS?

Gli IC MOS sono degli IC digitali la cui circuiteria fa uso di MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistors) - e, praticamente, non impiega resistori, diodi, transistori bipolari o altri componenti. Gli IC MOS sono già largamente usati al momento in cui scriviamo e la loro popolarità sta crescendo rapidamente, perchè gli elementi MOSFET permettono una maggior complessità che non gli elementi bipolari. Ciò significa più *circuiteria* e quindi un maggior numero di gate e di flip-flop, nella stessa *area* di un chip semiconduttore. Questa possibilità di condensare più funzioni in un minuscolo pezzo di silicio fornisce la chiave per una maggior economia di circuiti integrati. Infatti, questa continua tendenza verso una sempre maggior complessità apre la strada al progresso dell'elettronica.

Per farvi un'idea approssimativa della complessità raggiungibile dalle tecniche dei circuiti integrati, date una occhiata alla Figura 12.1. Essa rappresenta un circuito integrato MOS piuttosto grande - quasi un quarto di pollice quadrato (1,61 cm^2). Occorrerebbero ben dodici di questi circuiti per coprire un francobollo. Malgrado ciò, esso è assai notevole perchè contiene l'equivalente di circa 6000 dispositivi discreti su un unico chip. Non vi preoccupate delle aree individuate da questa foto - basti dire che questo è un *calcolatore su un chip*.

Potete prendere questo chip MOS, aggiungergli una quantità non troppo grande di hardware e costruire un calcolatore completo contenuto in una custodia avente all'incirca le dimensioni di una normale scatola. E questo piccolo calcolatore avrebbe tutta la potenza - e le stesse possibilità di risolvere dei problemi complessi - che un calcolatore occupante un'intera stanza aveva pochi anni fa i circuiti integrati

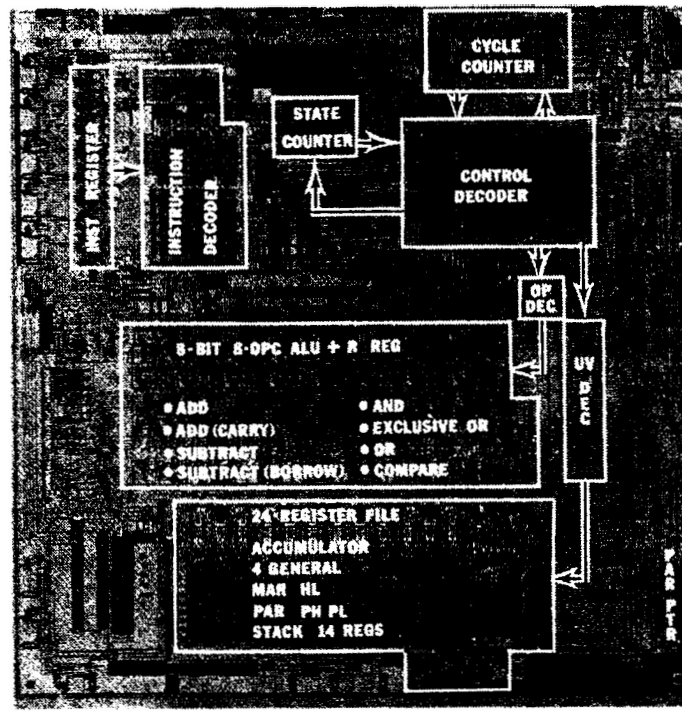
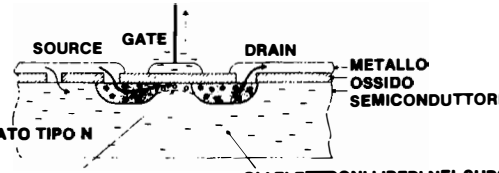


Figura 12.1

IL CIRCUITO DI COMANDO RICHIAMA MOMENTANEAMENTE UN FLUSSO DI CORRENTE CONVENZIONALE FUORI DAL TERMINALE DI GATE, FACENDO COSI' ABBASSARE LA TENSIONE DI GATE (ACCUMULANDO GLI ELETTRONI IN ECCESSO NELLA METALLIZZAZIONE DI GATE)



UN "PONTE" DI LACUNE (ATTRATTE VERSO GLI ELETTRONI IN ECCESSO NEL GATE) SCAVALCA L'INTERSTIZIO DI TIPO N.

GLI ELETTRONI LIBERI NEL SUBSTRATO SONO IMPEDITI DALL'INTERFERIRE CON IL "PONTE" PER REPULSIONE DAGLI ELETTRONI IN ECCESSO NEL GATE

Figura 12.2

bipolari sono già una cosa abbastanza fantastica - ma la tecnologia MOS concentra una complessità molte volte maggiore in un chip delle stesse dimensioni.

COME FUNZIONANO I MOSFET?

In Figura 12.2 è rappresentata in modo indicativo una sezione trasversale del tipo di MOSFET usato negli IC MOS. Due regioni P, chiamate *source* (sorgente) e *drain* (scarico), vengono diffuse fianco a fianco nella superficie di una piastrina di silicio tipo N. Uno strato isolante di ossido di silicio viene fatto crescere sopra la superficie. Due strisce metallizzate vengono fatte penetrare nell'ossido attraverso delle finestre, fino ad entrare in contatto con il silicio. Una terza striscia metallica, il *gate* (porta), viene sovrapposta all'ossido, a cavallo dell'interstizio esistente fra le due regioni P.

Queste parti di un MOSFET compiono, in un circuito, pressochè la stessa *funzione* compiuta dalle parti corrispondenti di un transistore PNP. *Il source agisce come l'emettitore,* il *gate,* come la *base* e il *drain,* come il *collettore.* Quando al gate non è applicato nessun segnale di comando, la corrente di lavoro - che cerca di passare dal source al drain - non può scorrere. Source, substrato e drain funzionano, in sostanza, come un transistore PNP - essi bloccano la corrente di lavoro, a meno che, dalla regione N, non venga richiesta una corrente di comando (corrente convenzionale). Ma, nel MOSFET, la corrente cerca, invece, di *entrare* nella regione, N provenendo dalla striscia metallizzata della sorgente, attraverso una finestra aperta a questo scopo nello strato di ossido.

Supponiamo, adesso, di collegare il terminale di gate ad un circuito di comando che richiama una corrente convenzionale. Il gate è isolato, per cui la corrente di comando non può scorrere in continuazione. Ma un breve flusso riesce a venir fuori. Ciò significa che la pressione esercitata dalla tensione sul gate viene ridotta e che un eccesso di elettroni si accumula nel metallo del gate sopra l'ossido. Questi elettroni in eccesso attraggono fuori dalle regioni P delle lacune - "cariche dissimili si attraggono". Nello stesso tempo, essi costringono degli elettroni liberi nel substrato tipo N ad andar *via* dal gate - "cariche simili si respingono". L'ossido isolante impedisce alle lacune di raggiungere il gate, per cui esse si distribuiscono proprio sotto l'ossido, formando un ponte fra source e drain, attraverso il quale può passare la corrente di lavoro. Questo ponte è, in effetti, una striscia di regione P e viene chiamato *canale.* Quanto più bassa è la pressione esercitata dalla tensione di gate, tanti più elettroni in eccesso vi sono, tanto più grande diventa lo spessore del canale e tanta più corrente di lavoro scorre.

Così il MOSFET si comporta in modo molto simile a un transistore PNP. Ma, mentre il transistore PNP viene mandato in conduzione da una *corrente* applicata al terminale di comando, il MOSFET viene mandato in conduzione da una *tensione.*

La denominazione "a effetto di campo" applicato a questo tipo di transistore si riferisce al modo in cui esso viene mandato in conduzione - dall'*effetto* del *campo* elettrico (una regione soggetta a forze o ad influssi) creato dagli elettroni di gate in eccesso. Il terminale "metallo-ossido-semiconduttore" descrive la *struttura* in cui si crea questo campo elettrico - un gate metallico, uno strato di ossido e un canale semiconduttore (vedremo fra poco che certi FET non impiegano le strutture MOS).

Un'altra denominazione dei FET è "unipolari", cioè a una sola polarità; ciò si riferisce al fatto che la corrente di lavoro, quando scorre dal source al drain, attraversa solo *un* tipo di materiale semiconduttore - nel nostro esempio esso è del tipo P. I transistori "bipolari" vengono così chiamati perchè la loro corrente di lavoro scorre attraverso delle regioni di *entrambe* le polarità P e N.

I MOSFET vengono identificati per mezzo delle lettere "P" e "N". Proprio come ci sono dei transistori bipolari NPN e PNP, così ci sono dei FET a canale N e dei FET a canale P. Il MOSFET di fig. 12.2 è chiamato di tipo a "canale P" perchè il canale è, in effetti, un ponte di semiconduttore del tipo P, passante attraverso il substrato del tipo N. Esso viene ulteriormente classificato come di "tipo ad arricchimento", facendo riferimento all'arricchimento (o accrescimento) della conduzione di corrente di lavoro, ad opera della tensione di comando applicata al gate.

L'altro tipo di MOSFET viene chiamato di "tipo a impoverimento"; esso viene creato *diffondendo* il canale permanentemente al suo posto durante la fabbricazione. In questo modo, il source, il canale e il drain sono una striscia continua di materiale del tipo P o del tipo N. Il MOSFET del tipo a impoverimento è normalmente in conduzione e viene mandato all'interdizione solo applicando una tensione di comando al gate. Per respingere e arrestare una corrente di lacune, a un tipo di impoverimento a canale P, si deve applicare una tensione di gate *positiva* per respingere gli elettroni liberi e arrestarne il flusso, a un tipo a impoverimento a canale N si deve applicare una tensione di gate *negativa*. Come risulta, tuttavia, il tipo ad arricchimento usato nel nostro esempio è molto più utile negli IC.

In Figura 12.3, vediamo il simbolo del MOSFET di tipo ad arricchimento a canale P di Figura 12.2. La linea interrotta attraverso la parte centrale rappresenta il canale, che è normalmente interrotto e richiede un segnale di gate per incrementare o *arricchire* la conduzione.
La freccia diretta dal canale al substrato indica che si tratta di un dispositivo a canale P; ricordiamo che le frecce stanno a indicare le giunzioni e sono dirette da P a N. Il

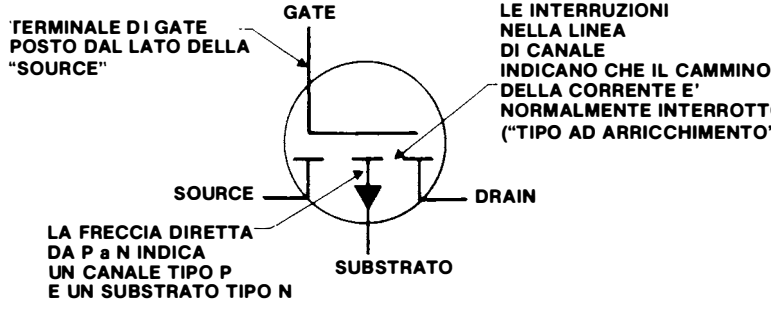


Figura 12.3

source e il drain sono contraddistinti dalla presenza del terminale di gate al disopra del *source.*

IN CHE MODO I MOSFET PERMETTONO DI OTTENERE DEI CIRCUITI AD ALTA COMPLESSITA'?

Molte particolari caratteristiche del MOSFET contribuiscono a render possibile la realizzazione di circuiti integrati di una complessità straordinaria.

Prima di tutto, un MOSFET occupa su un chip *molto meno spazio* di un transistore bipolare, perchè richiede una sola diffusione invece di tre. In Figura 12.4 sono riportate le dimensioni relative dei due tipi di dispositivi. Questo processo ad una

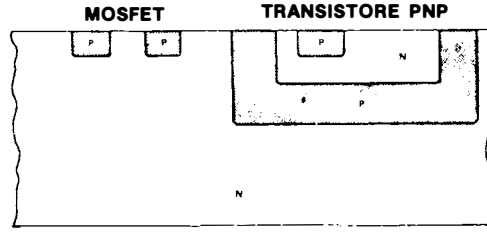


Figura 12.4

sola diffusione porta con sé altri due vantaggi - la lavorazione è meno costosa e la resa dei chip buoni da ogni piastrina è più alta, poiché le operazioni di diffusione tendono a indurre dei difetti.

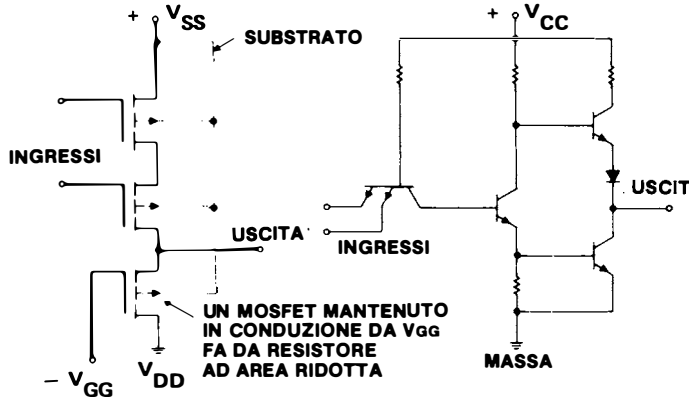


Figura 12.5

In secondo luogo, i circuiti MOSFET sono, di solito, *più semplici* degli equivalenti circuiti a transistori bipolari. In Figura 12.5, possiamo vedere un esempio abbastanza tipico di quanto detto.

In terzo luogo, come appare ancora dalla figura 12.5, un MOSFET *può venir usato come resistore,* facendo la sua regione di canale alquanto più lunga e stretta del solito e collegando il suo gate con un'alimentazione a bassa tensione costante (chiamata "V_{GG}"), in modo che esso si mantenga in conduzione. I MOSFET usati in questo modo, come resistori, sono ben poco più grandi dei MOSFET normali. D'altra parte, i resistori a diffusione, del tipo usato negli IC bipolari, se devono avere una resistenza apprezzabile, dovranno essere estremamente lunghi ed occupare molto più spazio di un transistore bipolare.

DOVE VENGONO USATI GLI IC MOS?

Gli IC MOS vengono usati essenzialmente negli stessi blocchi costitutivi digitali per cui vengono usati gli IC bipolari, ma dando risalto a fattori diversi. Gli IC MOS normali sono fortemente orientati verso i blocchi di tipo *memoria*, specialmente registri a scorrimento, memorie a sola lettura (ROM) e memorie ad accesso casuale (RAM). Le RAM sono i soli circuiti che non abbiamo ancora menzionato; esse sono un genere speciale di *registri,* costituiti da molti flip-flop. In una RAM, l'informazione può venir memorizzata (scritta) in - o reperita (letta) da - *uno qualsiasi* dei flip-flop scelto a piacere. Le memorie economiche richiedono una capacità di memorizzazione per molte migliaia di bit, per cui l'enorme complessità resa possibile dalle tecniche MOS è l'ideale per costruire delle memorie.

Gli IC MOS *decisionali* trovano molte importanti applicazioni in sistemi in cui un basso prezzo è più importante di una elevata velocità di funzionamento. Le moderne calcolatrici da tavolo, per esempio, fanno uso di circuiteria MOS, sia per prendere decisioni che per le memorie. I pochi microsecondi impiegati da queste calcolatrici per risolvere un problema e presentare la soluzione sembrano un istante, almeno a noi, lenti esseri umani. Per contro, nei grandi calcolatori in cui, ogni secondo,possono essere prese milioni di decisioni, i circuiti MOS sono abbastanza più lenti di quelli bipolari tanto da dar luogo ad una forte differenza.

DOVE VENGONO USATI I TRANSISTORI DISCRETI AD EFFETTO DI CAMPO?

Finchè stiamo parlando dei FET, sarà utile fare una breve disgressione e accennare all'uso dei FET discreti. Anche se le minuscole dimensioni dei MOSFET presentano pochi vantaggi nella costruzione dei transistori discreti, essi sono importanti in certe applicazioni in cui occorrono dei transistori controllati in *tensione*, anziché dei transistori controllati in *corrente*, come sono i transistori bipolari.

La Figura 12.6 dà un'idea di un caso in cui sono desiderabili dei transistori controllati in tensione. In questo caso, abbiamo usato dei FET a *giunzione*, che non vengono fabbricati con il processo MOS, ma funzionano in modo molto simile ai MOSFET del tipo ad impoverimento. Il problema, qui, è di amplificare il segnale proveniente da un microfono ad alta impedenza per eccitare l'altoparlante. Un microfono ad alta impedenza non può generare molta *corrente;* invece esso genera una *tensione* relativamente alta. Con un microfono ad alta impedenza non possiamo usare molto bene un transistore *bipolare,* come abbiamo fatto nel capitolo 8, perchè i tran-

sistori bipolari sono azionati da una corrente di comando. Ci vorrebbero diversi stadi amplificatori bipolari messi in fila per amplificare la piccola corrente ottenuta da un microfono ad alta impedenza.

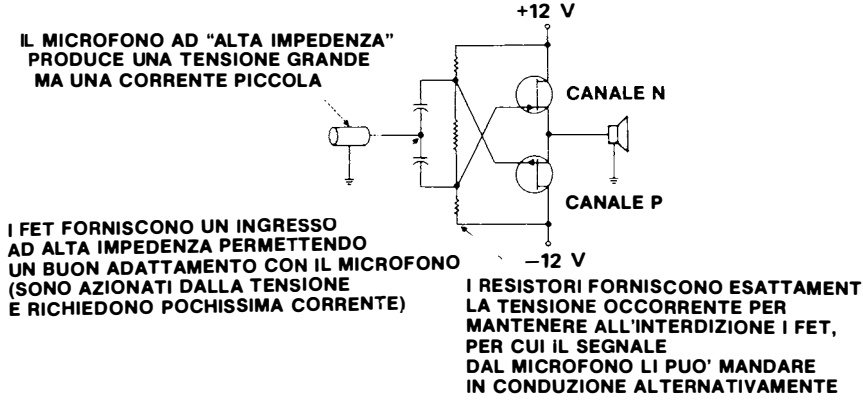


Figura 12.6

Facciamo, invece, uso di FET, come indicato in Figura 12.6. I FET richiedono una corrente di comando molto piccola. Le fluttuazioni di tensione provenienti dal microfono fanno produrre al FET delle fluttuazioni di correnti aventi una potenza sufficiente ad eccitare l'altoparlante. Possiamo dire che "i FET hanno un'entrata ad alta impedenza ". Abbiamo così un buon andamento fra microfono e FET e il problema è risolto.

I FET trovano molte altre applicazioni e vengono usati il più delle volte perchè essi controllano la corrente di lavoro in risposta e dei segnali di *tensione* anzichè di corrente.

Adesso dobbiamo tornare alla nostra discussione sui circuiti integrati. Abbiamo esaminato gli IC *digitali*, per cui ora restano solo gli IC *lineari*.

COSA SONO I CIRCUITI INTEGRATI LINEARI?

I circuiti integrati lineari sono dei circuiti di tipo amplificatore sotto forma integrata. La denominazione "lineare" è solo un altro modo di esprimere il concetto di "regolatore" in contrapposizione a quello di "commutatore". La tensione in uscita da un circuito di questo tipo varia in maniera regolare ed uniforme, al variare, con legge costante, della tensione in entrata, cosicchè il diagramma che dà la tensione in uscita in funzione della tensione in entrata è approsimativamente una linea retta - da cui la denominazione di *lineare*. In contrasto con questo andamento, come avete già visto, il segnale di uscita da un circuito commutatore salta bruscamente da un livello ad un altro.

Poichè i circuiti lineari sono degli amplificatori, la loro funzione è di fare *aumentare* la potenza, la corrente o la tensione applicata al loro ingresso.

QUALI SONO ALCUNI IC LINEARI TIPICI?

Poichè adesso avete una chiara idea di come i circuiti a transistori discreti compiono la loro funzione di regolazione - la loro funzione lineare - possiamo trattare degli IC lineari senza entrare nei particolari della loro circuiteria interna. E poichè ci sono migliaia di tipi di potenziali IC lineari, dobbiamo trattare l'argomento parlando solo di alcuni circuiti *tipici.*

Gli IC lineari possono venir classificati grosso modo in tre gruppi: circuti lineari di tipo generico, circuiti d'interfaccia, circuiti per beni di consumo e comunicazioni.

I **circuiti lineari generici** compiono la funzione amplificatrice in un gran numero di sistemi diversi. Appartengono a questa categoria di circuiti gli amplificatori operazionali, gli amplificatori video, i comparatori di tensione, i regolatori di tensione e diversi altri tipi di amplificatori. Questi furono i primi circuiti lineari a venire integrati con successo.

Gli amplificatori operazionali, in gergo abbreviati in "op-amps", sono probabilmente i circuiti più importanti fra tutti gli IC lineari. Un amplificatore operazionale ha un guadagno di tensione estremamente elevato e delle entrate differenziali (ricordate che abbiamo discusso le entrate differenziali nei capitoli 2 e 3). Gli amplificatori operazionali vennero originariamente usati per compiere delle operazioni matematiche nei calcolatori analogici, ma ora sono usati dovunque occorra un'amplificatore a bassa potenza, in quasi ogni sistema. Essi possono venire usati come principale elemento amplificatore in una larga varietà di applicazioni semplici con l'aggiunta di altri componenti; le applicazioni vanno dai controller delle antenne TV ai trasmettitori radio.

I **circuiti d'Interfaccia** sostanzialmente, amplificano i segnali d'informazione entranti nei - o uscenti dai - sistemi digitali. Essi fanno da "intermediari", o *interfacce,* che permettono di accoppiare fra loro i vari sistemi di un sistema digitale completo.

I circuiti d'interfaccia possono essere classificati in tre gruppi principali:

I *memory drivers* e i *sense amplifiers* servono rispettivamente da unità di scrittura e di lettura per le memorie magnetiche. I drivers immettono l'informazione digitale nelle memorie e i sense amplifiers estraggono l'informazione.

I *line drivers* e i *line receivers* compiono una funzione molto simile, ma ai capi di lunghe linee di trasmissione fra parti diverse di un sistema digitale. Essi trasmettono e ricevono le informazioni digitali - a volte attraverso un continente.

I *peripheral drivers* sono del tutto simili ai memory drivers ed ai line drivers. Ma essi pilotano le apparecchiature periferiche di un sistema digitale - le unità di crescita, come le stampanti e gli indicatori di informazioni (displays). I peripheral drivers compiono questa funzione traducendo i segnali digitali a bassa potenza dagli stadi "decisionali" nei segnali di potenza richiesti dallo stadio "di azione".

I circuiti per beni di consumo e comunicazioni rappresentano due categorie non esattamente distinte. I circuiti per beni di consumo sono degli IC usati nelle apparecchiature domestiche ricreative e nell'elettronica automobilistica. Essi comprendono una larga gamma di amplificatori, dagli amplificatori audio (acustici) a quelli destinati all'eccitazione di piccoli altoparlanti ed agli elaboratori di segnali di radiofrequenza. I circuiti per comunicazioni sono un gruppo di amplificatori usati nei sistemi radio militari e industriali.

Con questo, siamo arrivati alla fine della nostra trattazione sui circuiti integrati lineari e , con essa, di questo libro.

Speriamo che possiate costruire sulle basi da voi acquisite durante lo studio di questi argomenti, perchè, più voi siete in grado di capire i semiconduttori, circuiti e sistemi, e meglio potrete godere, e aiutare gli altri a godere, i benefici dell'Epoca dei Semiconduttori.

QUESITI RELATIVI AL CAPITOLO 12

1. Il principale vantaggio presentato dall'uso negli IC dei MOSFET anzichè di una circuiteria a transistori bipolari è:
- ☐ a. Una velocità di funzionamento più alta di quella dei circuiti bipolari
- ☐ b. Con gli IC MOS occorre un minor numero di connessioni di alimentazione
- ☐ c. Una complessità molto maggiore (un maggior numero di gate e di flip-flop in un'area di chip più piccola) che con i circuiti bipolari - e perciò una maggiore economia.
- ☐ d. I progettisti dei sistemi hanno maggior familarità con la circuiteria MOS
- ☐ e. Non c'è nessun vantaggio particolare

2. Il principale vantaggio di cui si è parlato al punto 1 è dovuto al fatto che:
- ☐ a. I MOSFET occupano un'area di chip molto minore che non i transistori bipolari
- ☐ b. Nei chip MOS sono sovrapposti diversi strati distinti di circuiteria
- ☐ c. I MOSFET possono essere usati come resistori e sono molto più piccoli
- ☐ d. La circuiteria digitale a MOSFET è generalmente molto semplice (pochi componenti per gate)
- ☐ e. Tutto come sopra, tranne che in b

3. Un MOSFET del tipo ad arricchimento a canale P (del genere di quelli usati negli IC MOS) compie pressapoco la stessa funzione di un transistore PNP, senonchè:
- ☐ a. E' considerevolmente più grande
- ☐ b. Funziona molto più rapidamente
- ☐ c. Regola ma non commuta
- ☐ d. E' controllato in tensione anzichè in corrente, per cui richiede una corrente molto ridotta al terminale di comando (gate)
- ☐ e. E' controllato in corrente anziché in tensione come un transistore bipolare

4. I chip IC MOS sono facili ed economici da lavorare, perchè:
- ☐ a. Sono di complessità molto ridotta
- ☐ b. I chip sono molto più piccoli di quelli occorrenti per i transistori bipolari
- ☐ c. Occorre solo un'operazione di diffusione, in confronto alle tre richieste degli IC bipolari.
- ☐ d. Non richiedono assolutamente nessuna diffusione
- ☐ e. Come in a e b

5. I terminali di un transistore ad effetto di campo (sia esso di tipo MOS o a giunzione, del tipo ad arricchimento o ad impoverimento), corrispondenti rispettivamente ad emettitore, base e collettore dei transistori bipolari, sono:
- ☐ a. Source, gate e drain
- ☐ b. Anodo, gate e catodo
- ☐ c. Ingresso, alimentazionze e uscita
- ☐ d. Metallo, ossido e semiconduttore
- ☐ e. Drain, canale e source

6. Una ragione importante per cui gli IC MOS vengono attualmente usati principalmente per i blocchi costitutivi di tipo memoria come i registri a scorrimento, anzichè per i blocchi decisionali, è che:

☐ a. La velocità di funzionamento dei circuiti IC MOS odierni è molto bassa, per cui, nei sistemi ad alta velocità è, di solito, più conveniente far uso di IC bipolari per lunghe "stringhe" di decisione
☐ b. I circuiti MOS, per la loro stessa natura, non possono venir usati per prendere decisioni
☐ c. I progettisti sono più abituati a usare dei MOS per i blocchi di memoria
☐ d. Le memorie richiedono l'alta velocità di funzionamento dei circuiti MOS, mentre i circuiti decisionali non lo richiedono
☐ e. La complessità non è assolutamente un vantaggio importante per la circuiteria decisionale

7. La ragione più comune per cui un cliente fa uso, in un circuito, di un FET discreto, anzichè di un transistore discreto bipolare, è che:
☐ a. Il FET è, di solito, meno costoso
☐ b. I FET sono, generalmente, capaci di dissipare più potenza
☐ c. I FET presentano, generalmente, una maggior affidabilità dei transistori bipolari
☐ d. I FET consentono una maggior complessità nelle configurazioni discrete
☐ e. Certe situazioni richiedono un transistore controllato in tensione anzichè un tipo bipolare controllato in corrente

8. Gli IC sono per lo più:
☐ a. Molto dritti come aspetto fisico - di qui il nome "lineare"
☐ b. Essenzialmente degli amplificatori di vari tipi
☐ c. Dei circuiti di tipo commutatore in contrapposizione ai tipi digitali
☐ d. Poco importanti nel campo dei semiconduttori perchè il loro uso è limitato solo a pochi sistemi altamente specializzati
☐ e. Noti solo a poche persone

9. Nominate un tipo importante e molto usato di IC lineare che abbia un guadagno di tensione estremamente elevato e delle entrate differenziali, originariamente usato per operazioni matematiche nei calcolatori analogici, ma ora usato in una larga varietà di applicazioni:

☐ a. Circuiti per beni di consumo
☐ b. Circuiti per comunicazioni
☐ c. Circuiti d'interfaccia
☐ d. Amplificatori operazionali
☐ e. Amplificatori per sensori (sense amplifiers)

10. Qual è l'utilizzazione del gruppo di IC chiamati "circuiti d'interfaccia"?
☐ a. Sono degli amplificatori "general purpose" non specializzati
☐ b. Vengono usati in radiotecnica, TV ed elettronica per auto
☐ c. Vengono usati principalmente in applicazione radio militare ed industriale
☐ d. Trasferiscono informazioni in ingresso e in uscita ai sistemi analogici
☐ e. Sono delle unità di ingresso e di uscita per le informazioni digitali nei sistemi digitali

RISPOSTE AI QUESITI

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.c	1.a	1.e	1.e	1.e	1.d	1.b	1.a	1.e	1.c	1.b	1.c
2.b	2.c	2.c	2.b	2.a	2.a	2.a	2.c	2.d	2.e	2.e	2.e
3.d	3.b	3.b	3.a	3.a	3.d	3.d	3.d	3.c	3.e	3.c	3.d
4.a	4.c	4.c	4.b	4.a	4.a	4.a	4.e	4.a	4.d	4.a	4.c
5.d	5.c	5.b	5.e*	5.e*	5.d	5.c	5.b	5.b	5.a	5.a	5.a
6.c	6.c	6.b	6.d	6.e	6.e	6.b	6.e	6.a	6.b	6.b	6.a
7.c	7.a	7.e	7.e	7.a	7.e	7.c	7.e	7.e	7.d	7.d	7.e
8.b	8.b	8.e	8.d	8.d	8.a	8.c	8.a	8.c	8.c	8.d	8.b
9.a	9.d	9.e	9.f	9.a	9.a	9.d	9.b	9.e	9.e	9.b	9.d
10.c	10.d	10.e	10.g+	10.e	10.a	10.e	10.c	10.e	10.a	10.e	10.e
	11.b			11.e	11.b						
	12.d										

* Tranne "Nulla di tutto ciò", naturalmente.
\+ Tranne "Tutto come sopra", naturalmente.

14.000
(13207)

Consente di comprendere i semiconduttori e come questi funzionano insieme in sistemi elettronici a stato solido. Un corso autodidattico in 12 lezioni, completo di quesiti e di glossari, relativo alla teoria di base e all'uso di diodi, transistor, thyristori, dispositivi elettronici e circuiti integrati bipolari, MOS e lineari. Scritto in forma piana, il corso fa uso soltanto di semplici nozioni di aritmetica e non richiede cognizioni tecniche particolari.

16

Comprendere l'Elettronica a Stato Solido

a cura del "Learning Center" della Texas instruments

JACKSON ITALIANA EDITRICE